

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Modelação hidrológica de inundações urbanas baseada em dados geoespaciais de alta resolução**

**Eliana Ribeiro Almeida**

Orientadores:

Professora Doutora Cristina Catita  
Professora Doutora Paula Redweik

Trabalho de Projeto  
Mestrado em Engenharia Geográfica

**2015**



## Resumo

---

As inundações causadas por precipitações excessivas são um fenómeno que com o agravamento das alterações climáticas, tem vindo a acontecer frequentemente. Estas são sentidas, em meios urbanos, de forma diferente da dos meios menos urbanizados, afetando o comércio, os transportes, o dia-a-dia da população, ou seja, o funcionamento de uma cidade ou parte dela.

A cidade de Lisboa por norma todos os anos é alvo de mais do que um cenário de inundação. As fortes precipitações que por vezes ocorrem, associadas à morfologia atual da cidade e ao facto da antiga morfologia ser constituída por inúmeras linhas de água, são fatores contributivos para tais cenários.

A elaboração deste projeto surge com a necessidade que o Serviço Municipal de Proteção Civil de Lisboa tem em criar uma ferramenta que ajude a prever a ocorrência de inundações, para que se possa mais facilmente planear as medidas necessárias a tomar para evitar e atenuar os impactos de tais precipitações no funcionamento da cidade. Para a sua criação, foi desenvolvida uma metodologia que combina o uso dos Sistemas de Informação Geográfica com o uso de modelos hidrológicos, para modelar geograficamente as áreas inundadas.

Uma vez que a área de estudo compreende um meio bastante urbanizado, a cidade de Lisboa, constituída por inúmeros objetos de diferentes classes, foi necessário recorrer à utilização de dados de alta resolução para obter resultados o mais coerentes possível com a realidade. Foi testada a determinação das linhas de acumulação de água sobre uma superfície LiDAR, com resolução espacial de 1 m, comprovando-se que é um processo funcional. Contudo, e porque a superfície usada neste estudo não abrangia a totalidade da área de estudo, gerou-se um modelo de superfície, garantindo a resolução espacial de 1 m, através de informação altimétrica pontual correspondente ao terreno e ao edificado existente na cidade.

Na modelação hidrológica esta superfície foi combinada com a informação referente à impermeabilidade dos solos e com valores pluviométricos registados em dias de precipitação excessiva. Assim determinaram-se as zonas da cidade que inundam, para cada cenário de precipitação analisado, e a respetiva altura de inundação nas zonas afetadas. A validação dos resultados foi feita através do estudo da correlação espacial existente entre a localização das ocorrências registadas pelo Regimento de Sapadores Bombeiros em datas específicas de

precipitação anômala, e a distância de cada ocorrência à zona mais próxima de inundação, verificando-se que existe correlação espacial pois a distância às zonas de inundação é inversamente proporcional à quantidade de ocorrências.

**Palavras-chave:** Modelo hidrológico, SIG, LiDAR, Modelo de superfície, Inundações urbanas

## ***Abstract***

---

Floods caused by excessive precipitation are a phenomenon which with the increase of climatic changes, has been happening frequently. These have different consequences in urban areas in different ways, affecting commerce, transportation, population, therefore the normal work of a city or part of it.

The city of Lisbon is affected by events of flood every year. The strong precipitations that sometimes occur associated with city's actual morphology and the old morphology with several lines of water are influential factors for this situation.

The elaboration of this project comes with the necessity to create a tool to help prevent future occurrences of flooding by the Serviço Municipal de Proteção Civil de Lisboa to more easily planning a group of measures to avoid the impacts on the life of the city. For its creation, a methodology was developed which combines the usage of Geographic Information Systems and hydrological models, in order to geographically model the flooded areas.

Having in count that the area in study comprehends an urbanized area, the city of Lisbon, built by several objects of different classes, it was necessary to call upon high resolution data in order to obtain the most coherent results possible with the reality of the city. The determination of water accumulation lines was tested over a LiDAR surface with spatial resolution of 1 m, proving that it is a functional process. However, because the surface used in this study does not cover the entire study area, a surface model was generated, ensuring the spatial resolution of 1 m using altimetry point information regarding the terrain and existing buildings in the city.

On the hydrological modeling, this surface was combined with the impermeability information of the soils and rainfall values gathered in days of excessive rain. This way, the city areas that got flooded were determined for each precipitation event and in each place the height range was analysed. The evaluation of these results was made studying the spatial correlation existing between the localization of the occurrences recorded by Regimento de Sapadores Bombeiros, in specific dates of anomalous precipitation, and the distance of each occurrence to the closest flooding zone, concluding that there is spatial correlation, because the distance to flood zones is inversely proportional to the amount of occurrences.

**Key-words:** Hydrological Model, SIG, LiDAR, Surface Model, Urban Flooding.

## Agradecimentos

---

Simples palavras escritas numa folha em branco tornam-se pouco para expressar o quanto me sinto agradecida às pessoas que me ajudaram nesta caminhada.

Em primeiro lugar quero agradecer à professora Cristina Catita por todo o seu apoio incondicional, dedicação, paciência, motivação e interesse, sem os quais não teria sido possível concretizar este projeto.

À professora Paula Redweik por todo o apoio prestado na parte inicial que envolveu a utilização dos dados LiDAR, pelas revisões e por todo o interesse demonstrado por este projeto.

Ao Serviço Municipal de Proteção Civil de Lisboa, por me terem dado a oportunidade de desenvolver este trabalho, nomeadamente à Dr<sup>a</sup>. Maria João Telhado, à Eng<sup>a</sup>. Luísa Coelho e restantes colegas do Gabinete de Análise de Riscos por me terem recebido tão bem, pela simpatia, companheirismo e por todo o apoio prestado.

À empresa LÓGICA, pela disponibilização dos dados LiDAR que foram utilizados.

Ao Lourenço Mendes, do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelas horas dedicadas a esclarecer as minhas dúvidas relativas ao HEC-RAS.

Aos professores do curso de Engenharia Geográfica por me terem transmitido os seus conhecimentos durante o meu percurso académico na FCUL.

Aos meus amigos e colegas de curso que partilharam comigo estes últimos anos e que de forma direta ou indireta contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, Luís e Júlia, que me deram a oportunidade de estudar, que sempre me indicaram os melhores caminhos a seguir e que sempre me apoiaram em todos os momentos. A eles devo tudo, sempre.

À minha irmã Mariana, que eu tanto adoro, por ser a melhor irmã que eu podia ter, e por todos os lanchinhos que me fez durante as minhas tardes dedicadas a este projeto.

Ao meu namorado e melhor amigo, Henrique, por estar sempre presente em todos os momentos felizes e por me confortar nos momentos menos bons.

Aos meus avós, Artur, Guilhermina e Manuela, por só me quererem bem.

# Índice

---

Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Gráficos .....	ix
Lista de Acrónimos .....	x
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Motivação.....	2
1.3 Serviço Municipal de Proteção Civil.....	3
1.4 Caracterização da área de estudo .....	6
1.5 Síntese da metodologia aplicada .....	8
1.6 Contribuição do trabalho.....	9
1.7 Estrutura da tese.....	10
2. Contexto.....	11
2.1 Introdução .....	11
2.2 Risco de inundação urbana .....	11
2.3 Revisão bibliográfica.....	13
2.3.1 Análise crítica dos estudos investigados.....	17
3. Fundamentação teórica .....	19
3.1 Modelos Digitais de Elevação (MDE).....	19
3.2 <i>Light Detection and Ranging</i> (LiDAR) .....	21
3.3 Limites de precipitação anómala.....	24
3.4 Bacias hidrográficas.....	26
3.5 Integração de ferramentas SIG na modelação hidrológica .....	27
4. Metodologia e análise dos resultados.....	29
4.1 Introdução .....	29
4.2 Especificações dos dados utilizados.....	30
4.3 Utilização de dados LiDAR .....	32
4.3.1 Tratamento de dados LiDAR.....	32
4.3.2 Determinação das linhas de acumulação de água .....	34

4.3.3 Avaliação do comportamento do algoritmo de detecção de linhas de água sobre o MDS LiDAR.....	39
4.4 Modelo de Superfície .....	39
4.4.1 Criação do MDT .....	40
4.4.2 Atribuição de elevação aos edifícios .....	43
4.4.3 Criação do Modelo de Superfície .....	46
4.4.4 Determinação das linhas de acumulação de água .....	49
4.4.5 Avaliação do comportamento do algoritmo de detecção de linhas de água sobre o modelo de superfície.....	53
4.5 Comparação entre o modelo de superfície gerado e o MDS LiDAR .....	54
4.5.1 Diferenças no edificado.....	55
4.5.2 Diferenças no terreno.....	57
4.6 Modelação hidrológica .....	59
4.6.1 Definição das bacias hidrográficas.....	60
4.6.1.1 Captação das linhas de acumulação de água e determinação das bacias .....	60
4.6.1.2 Parâmetros hidrológicos .....	63
4.6.1.2.1 Impermeabilidade dos solos.....	63
4.6.1.2.2 Métodos de perda e transformação da água.....	69
4.6.2 Modelação dos dados da precipitação .....	71
4.6.2.1 Bacias – Estimação dos parâmetros hidrológicos .....	72
4.6.2.2 Modelação da precipitação e especificações de controlo .....	73
4.6.3 Construção da geometria .....	75
4.6.4 Modelação da área de inundação .....	78
4.6.5 Mapeamento das inundações .....	81
4.7 Validação dos resultados com as ocorrências do RSB .....	85
5. Conclusões .....	90
5.1 Limitações.....	91
5.2 Perspetivas Futuras .....	92
Referências bibliográficas .....	93
Anexo A – Precipitações associadas a diversas durações e diferentes períodos de retorno (mm).....	97



## Lista de Figuras

---

Figura 1. Diagrama do Sistema de Proteção Civil .....	4
Figura 2. Diagrama do Departamento de Proteção Civil de Lisboa .....	5
Figura 3. Orografia da Cidade de Lisboa .....	7
Figura 4. Resultados obtidos pelo modelo <i>CityFlood</i> [Elberink et al., 2013] .....	15
Figura 5. Esquematização do projeto de <i>Mosuro</i> [Mosuro, 2012] .....	17
Figura 6. Diferença entre MDT e MDS .....	19
Figura 7. Etapas do processo de construção de um modelo TIN .....	20
Figura 8. Funcionamento do sistema LiDAR .....	23
Figura 9. Fluxograma da metodologia aplicada .....	29
Figura 10. MDS LiDAR .....	32
Figura 11. Processo de interpolação dos valores negativos .....	33
Figura 12. MDS LiDAR corrigido .....	34
Figura 13. Processo hidrológico do ArcGIS .....	34
Figura 14. MDS LiDAR sem depressões .....	35
Figura 15. Direções consideradas .....	36
Figura 16. Direções de escoamento do MDS LiDAR .....	36
Figura 17. Acumulação do escoamento no MDS LiDAR .....	37
Figura 18. Linhas de acumulação de água de acordo com o nível de importância .....	38
Figura 19. Linhas de acumulação de água sobre o edificado do LiDAR .....	39
Figura 20. Metodologia utilizada na construção do modelo de superfície .....	40
Figura 21. TIN criado com os pontos do MNA .....	42
Figura 22. MDT criado para o concelho de Lisboa .....	42
Figura 23. Classificação dos edifícios quanto à elevação .....	45
Figura 24. Divisão do MDT do concelho em 2 partes .....	46
Figura 25. Pontos correspondentes ao edificado .....	47
Figura 26. Pontos correspondentes ao terreno .....	48
Figura 27. Modelo de Superfície criado .....	49
Figura 28. Modelo de superfície sem depressões .....	50
Figura 29. Direções de escoamento no Modelo de Superfície .....	51
Figura 30. Acumulação do escoamento no Modelo de Superfície .....	51
Figura 31. Linhas de acumulação de água de acordo com o nível de importância .....	52
Figura 32. Cruzamento das linhas de água com o edificado .....	53
Figura 33. Linhas de acumulação de água sobre o MDS LiDAR e sobre o Modelo de Superfície .....	54
Figura 34. Diferenças no edificado entre o Modelo de Superfície e o MDS LiDAR .....	55
Figura 35. Histograma das diferenças no edificado .....	56
Figura 36. Exemplo do edifício MARCONI .....	56
Figura 37. Diferenças no terreno entre o MDS LiDAR e o Modelo de Superfície .....	57
Figura 38. Histograma das diferenças no terreno .....	58

Figura 39. Destaque de diferenças encontradas .....	58
Figura 40. Metodologia aplicada na construção do modelo hidrológico .....	59
Figura 41. Esquematização da determinação das bacias hidrográficas .....	60
Figura 42. Bacias hidrográficas e correspondentes linhas de acumulação de água.....	61
Figura 43. Elementos constituintes de cada bacia.....	62
Figura 44. Classificação da Rede Viária .....	65
Figura 45. Informação existente classificada quanto à .....	67
Figura 46. Carta de impermeabilização dos solos para Lisboa.....	68
Figura 47. <i>Wedge and prism storage</i> .....	69
Figura 48. Conversão da informação de cada bacia em grafo.....	71
Figura 49. Esquematização da construção do modelo meteorológico .....	71
Figura 50. Resultados do Modelo Meteorológico.....	75
Figura 51. Esquematização da construção da geometria .....	76
Figura 52. Linhas de acumulação, margens e linhas definidoras da curvatura.....	77
Figura 53. Secções transversais.....	78
Figura 54. Esquematização do processo de modelação da área de inundação .....	78
Figura 55. Atribuição dos resultados do modelo meteorológico às secções transversais.....	80
Figura 56. Modelação da inundação nas secções transversais.....	81
Figura 57. Inundação para o período de retorno de 2 anos .....	82
Figura 58. Inundação para o período de retorno de 10 anos .....	82
Figura 59. Inundação na Praça de Espanha.....	83
Figura 60. Inundação no Rossio .....	84
Figura 61. Diferenças entre os dois cenários.....	85
Figura 62. Ocorrências do dia 18/10/2008 .....	86
Figura 63. Ocorrências do dia 21/03/2013 .....	87
Figura 64. Ocorrências do dia 23/09/2012 .....	88
Figura 65. Total de ocorrências de inundação entre 2000 e 2013 .....	89

## Lista de Tabelas

---

Tabela 1. Limites mínimos de precipitação anómala para determinados intervalos de tempo ....	24
Tabela 2. Valores dos parâmetros a e b para várias durações e vários períodos de retorno .....	25
Tabela 3. Especificações dos dados utilizados .....	30
Tabela 4. Número de edifícios classificados e por classificar quanto ao número de pisos .....	44
Tabela 5. Número de divisões aplicadas às freguesias .....	47
Tabela 6. Classificação das classes de objetos do solo quanto ao .....	64
Tabela 7. Índices de impermeabilização utilizados .....	64
Tabela 8. Índices de impermeabilização atribuídos aos vários tipos de .....	66
Tabela 9. Valores de Precipitação utilizados no intervalo de 1 hora, para os períodos de Retorno considerados .....	74

## Lista de Gráficos

---

Gráfico 1. Correlação espacial das ocorrências do dia 18/10/2008 .....	86
Gráfico 2. Correlação espacial das ocorrências do dia 21/03/2013 .....	87
Gráfico 3. Correlação espacial das ocorrências do dia 23/09/2012 .....	88

## Lista de Acrónimos

---

ALS – *Airborne Laser Scanning*  
BGRI – Bases Geográficas de Referenciação de Informação  
CAD – *Computer Aided Design*  
CAOP – Carta Administrativa Oficial de Portugal  
CML – Câmara Municipal de Lisboa  
CMPC – Comissão Municipal de Proteção Civil  
DMAU – Direção Municipal do Ambiente Urbano  
DPC – Departamento de Proteção Civil  
ESRI - *Environmental Systems Research Institute*  
GAR – Gabinete de Análise de Riscos  
GPS – *Global Position System*  
HEC – *Hydrology Engineering Centre*  
IDF – Intensidade – Duração - Frequência  
IMU – *Inertial Measuring Unit*  
INE – Instituto Nacional de Estatística  
IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera  
LiDAR – *Light Detection and Ranging*  
LPI – *Local Partial Inertia*  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
MDS – Modelo Digital de Superfície  
MDT – Modelo Digital do Terreno  
MNA – Modelo Numérico Altimétrico  
PDM – Plano Diretor Municipal  
PME – Plano Municipal de Emergência  
RSB – Regimento de Sapadores Bombeiros  
SCS - *Soil Conservation Service*  
SIG – Sistemas de Informação Geográfica  
SMPC – Serviço Municipal de Proteção Civil  
TIN – *Triangular Irregular Network*  
TLS – *Terrestrial Laser Scanning*

USACE – *U.S. Army Corp of Engineers*

USDA - *United States Department of Agriculture*

# 1. Introdução

Desde os tempos primórdios até à atualidade que os problemas causados pelas inundações urbanas, devidas às fortes precipitações, têm vindo a ter cada vez mais notoriedade.

As alterações climáticas, que sempre estiveram presentes no planeta de uma forma equilibrada, aumentaram de forma preocupante desde a ascensão da era tecnológica, em que os processos produtivos necessitaram de utilizar cada vez mais as fontes energéticas, levando ao aumento do aquecimento global. Tem sido cada vez mais comum a ocorrência de eventos climáticos extremos com consequências que vão desde os prejuízos económicos até perdas de vidas causadas por inundações, furacões, ondas de frio ou de calor [Vaz, 2010].

Em Portugal, as inundações são responsáveis por perdas avultadas. Trata-se de um país muito exposto aos riscos de cheia e inundação, devido às suas características, e com o decorrer do tempo sofrerá danos significativos causados por estes riscos [APT, 2014].

A cidade de Lisboa, nos últimos anos tem sido também bastante afetada pelas inundações por fortes precipitações. O relevo acentuado da cidade e as antigas linhas de água nela existentes, assim como a obsoleta rede de saneamento muitas vezes obstruída, são os principais fatores contributivos para a ocorrência das inundações.

Este projeto aborda assim a temática do risco de inundação em espaços urbanos sob uma vertente preventiva.

Na metodologia utilizada neste projeto, recorre-se à utilização de tecnologias de Informação Geográfica, nomeadamente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e modelos hidrológicos genéricos que devidamente adaptados à realidade urbana e integrados em ambiente SIG geraram os resultados da modelação geográfica das áreas de inundação urbana.

Tendo como objeto de estudo o espaço urbano, este estudo requer a utilização de dados geográficos de elevado detalhe planimétrico e altimétrico. Para o efeito recorreu-se a dados produzidos por um varrimento *Light Detection and Ranging* (LiDAR) do espaço urbano, com 1 m de resolução espacial [Redweik *et al.*, 2011] e produziu-se um modelo de superfície com o nível de detalhe exigido, para a aplicação dos modelos hidrológicos em ambiente urbano.

Apesar de se ter consciência de que este tipo de fenómeno não se circunscreve a limitações administrativas do território, quer em termos de consequências, quer em termos de respostas de emergência, a área de aplicação do estudo incidiu apenas sobre o concelho de Lisboa, por razões de ordem administrativa subjacentes à área de atuação do Serviço Municipal de Proteção Civil (SMPC) de Lisboa, onde se realizou o estágio que deu origem a este projeto.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste projeto consiste na definição de uma metodologia que permita auxiliar a Proteção Civil a identificar as zonas da cidade de Lisboa mais suscetíveis a inundações provocadas pela precipitação excessiva.

Para o efeito, usaram-se modelos hidrológicos para a cidade de Lisboa baseados na utilização de um modelo digital de superfície (MDS). O MDS a usar deveria apresentar o detalhe necessário para que os resultados produzidos contemplassem a diversidade de objetos existentes no espaço urbano. Para a concretização desse objetivo, dispunha-se de uma cobertura de dados LiDAR de Lisboa, com uma resolução espacial de 1 m, mas que apenas cobria parte da área da cidade. Assim, no âmbito deste projeto e porque nova cobertura LiDAR seria demasiado dispendiosa, definiu-se ainda como objetivo gerar um MDS a partir de dados fotogramétricos e de informação relativa à altura do edificado da cidade já existente no SMPC. A superfície então produzida foi posteriormente sujeita a uma validação com os dados LiDAR existentes na área comum às duas superfícies.

Para que os modelos hidrológicos usados gerassem resultados fiáveis, a impermeabilidade dos solos representava uma fonte de informação indispensável. Não existindo esta informação com a resolução espacial necessária para este estudo, desenvolveu-se ainda uma metodologia baseada na informação geográfica, relativa ao uso e ocupação do solo, para produzir um mapa de impermeabilidade no qual toda a área da cidade fosse continuamente classificada com o seu respetivo índice de impermeabilidade.

Finalmente a validação das metodologias usadas e dos respetivos mapas de inundação urbana produzidos constituiu o objetivo final deste projeto. Para o efeito foram usadas, em datas específicas de precipitação intensa na cidade, as ocorrências registadas pelo Regimento de Sapadores Bombeiros (RSB) e os respetivos pedidos de ajuda à Proteção Civil devidamente georreferenciados de modo a estudar uma eventual correlação espacial entre estes dados e as zonas de maior inundação estimada pelos modelos.

## 1.2 Motivação

O passado de Lisboa encontra-se fortemente associado a cenários de inundação que interferiram no funcionamento normal da cidade. Tais situações continuam a ocorrer ao longo dos anos e interferem na vivência das populações, provocam danos sobre o edificado, pontos vitais da cidade ou em troços de infraestruturas localizados em determinadas zonas.

As últimas grandes ocorrências de inundações em Lisboa foram registadas em setembro e outubro de 2014 e formaram lençóis de água na zona da Avenida da Liberdade, inundaram as ruas da Baixa e a zona de Sete Rios e alagaram por completo a Praça de Espanha. A Calçada de Carriche e os túneis da Avenida João XXI e do Campo Grande foram áreas também afetadas por estas inundações.

A simulação de diversos cenários potencialmente danificadores permite conhecer o comportamento da cidade face à ocorrência de inundações. A identificação das áreas críticas constitui um conceito estratégico e de grande importância para o planeamento e a gestão de emergências, pois é com base no historial de ocorrências de efeitos graves que se torna possível definir um zonamento da cidade que proporcione a identificação dos locais que, para situações de previsão de inundações, necessitem de uma intervenção diferenciada.

O SMPC carece de instrumentos que possam ser utilizados no apoio à decisão perante a problemática das inundações. É nesse sentido que surge a necessidade de realizar este projeto, através da construção de uma ferramenta que, combinada com os valores de precipitação estimados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) possa ser útil para o serviço, na questão da prevenção das inundações. Usufruidor de uma ferramenta que determine as zonas mais suscetíveis à ocorrência de inundações, é possível definir melhor quais as medidas necessárias a tomar para evitar e atenuar os efeitos provocados por estas na cidade de Lisboa.

### **1.3 Serviço Municipal de Proteção Civil**

A Proteção Civil consiste na atividade que é desenvolvida pelo Estado, Regiões Autónomas e Autarquias Locais, cidadãos e entidades públicas e privadas, no sentido de prevenir riscos coletivos inerentes a situações de acidentes graves ou catástrofes, atenuar os seus efeitos no caso de ocorrência das situações, proteger e socorrer as pessoas e os bens em perigo, e apoiar a reposição da normalidade da vida das pessoas afetadas. É uma atividade com carácter permanente, multidisciplinar e plurisectorial [Decreto Lei nº27/2006].

Trata-se de uma atividade desenvolvida a nível nacional (Figura – 1), regida pelos princípios de prioridade, prevenção, precaução, subsidiariedade, cooperação, coordenação, unidade de comando e informação.

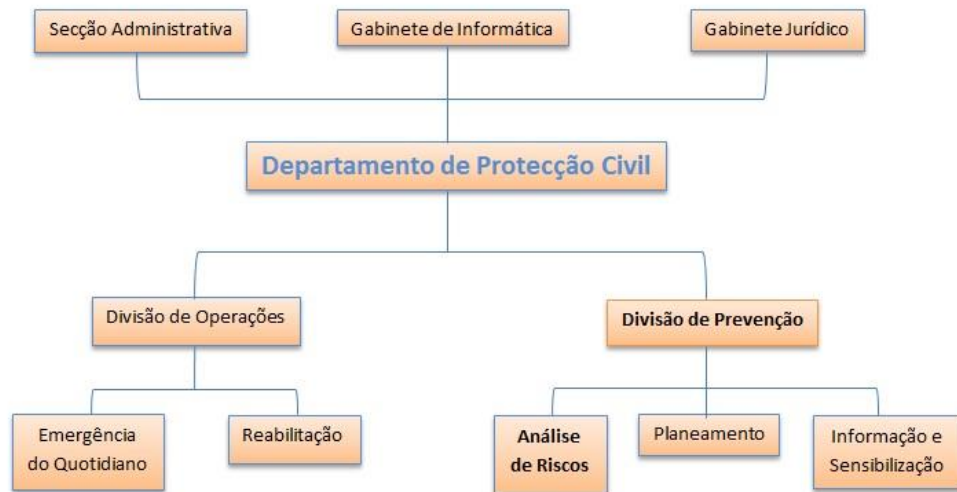




**FIGURA 1. DIAGRAMA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CIVIL**

No âmbito municipal, a Proteção Civil tem as responsabilidades descritas anteriormente mas cingidas ao território municipal. A Comissão Municipal de Proteção Civil (CMPC) é um organismo que assegura que todas as entidades e instituições de âmbito municipal necessárias às operações de proteção e socorro, emergência e assistência se articulem entre si, garantindo os meios necessários à gestão da ocorrência em cada caso concreto.

O SMPC executa as atividades de proteção civil no âmbito municipal e assegura o funcionamento de todos os organismos municipais de Proteção Civil. O Departamento de Proteção Civil (DPC) da Câmara Municipal de Lisboa (CML) visa prever e minimizar os riscos existentes na cidade de Lisboa, e atenuar a ocorrência de acidentes graves e catástrofes. É constituído por uma secção administrativa, um gabinete jurídico e um gabinete de informática, e por duas divisões: a Divisão das Operações e a Divisão de Prevenção (Figura - 2).



**FIGURA 2. DIAGRAMA DO DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO CIVIL DE LISBOA**

A divisão de prevenção é constituída pelo Gabinete de Análise de Riscos (GAR), onde parte do presente projeto foi desenvolvido, no âmbito de um estágio de 6 meses, decorrido no período de 19 de março de 2014 a 19 de setembro de 2014, o gabinete de planeamento e o gabinete de informação e sensibilização. No GAR é efetuado o levantamento, a previsão e a prevenção dos riscos coletivos do município de Lisboa, tratando-se estes das condições meteorológicas adversas, as inundações, os incêndios florestais e urbanos, os movimentos de massas em vertentes, os acidentes no transporte e armazenamento de matérias perigosas, os acidentes graves de trânsito, os danos em estruturas e infraestruturas, os sismos com posterior ocorrência de *tsunamis* e outros riscos relacionados com desordens públicas e epidemias, conforme estipulado no Plano Municipal de Emergência (PME) e no Plano Diretor Municipal (PDM).

No caso da ocorrência de inundações em Lisboa, é executado o PME que consiste num conjunto de operações de proteção civil que asseguram a criação de condições favoráveis ao empenhamento rápido, eficiente e coordenado de todos os meios e recursos disponíveis e dos que venham a ser disponibilizados. Este plano divide-se em duas fases essenciais, a fase de emergência que caracteriza as ações de resposta tomadas e desenvolvidas nas primeiras horas após a ocorrência da inundação, e a fase de reabilitação que engloba o conjunto de ações e medidas de recuperação destinadas à reposição rápida

da normalidade das condições de vida da população afetada e também o restabelecimento das infraestruturas, serviços públicos e privados considerados essenciais [SMPC,2012].

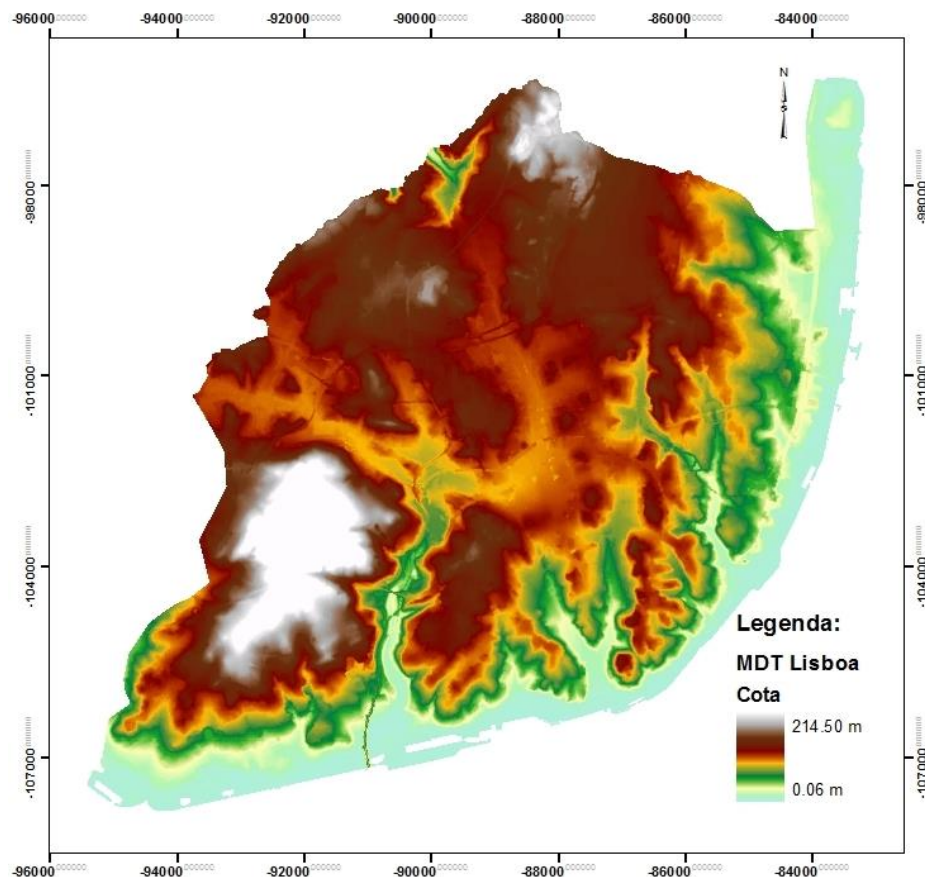
O desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão que simulem cenários de inundação por precipitação, que tenham ocorrido e que possam vir a ocorrer, vem permitir à Proteção Civil realizar uma prevenção mais otimizada do risco de inundação na cidade de Lisboa, permitindo a identificação das zonas da cidade que são vulneráveis ao risco, e destacando as zonas mais sujeitas à ocorrência de inundação. É neste sentido que surge a criação de um modelo hidrológico para a cidade de Lisboa, contribuindo assim para que a Proteção Civil garanta uma melhor prevenção do risco de inundação e, por conseguinte uma atuação mais rápida e eficaz aquando das ocorrências destas.

## **1.4 Caracterização da área de estudo**

A vulnerabilidade de Lisboa face ao risco de inundação encontra-se ligada ao grau de permeabilidade do solo e ao relevo da cidade. Contudo, devido ao elevado índice construtivo, que consequentemente aumenta o grau de impermeabilização, as alterações registadas ao nível morfológico e da geologia superficial, nem sempre constituem uma condição importante no estudo do fenómeno das inundações. O concelho de Lisboa, integrado na unidade geomorfológica denominada por Orla Sedimentar do Tejo e do Sado, é constituído predominantemente por terrenos de origem sedimentar, caracterizados por apresentarem uma certa permeabilidade por fissuração. São então espaços menos vulneráveis a situações de inundação, os de maior permeabilidade, encontrando-se em posição contrária as áreas aluvionares, onde sob uma camada permeável ocorre uma camada impermeável [SMPC, 2009].

Relativamente à sua morfologia, Lisboa apresenta um relevo acidentado, com frequentes variações na altitude. As maiores altitudes encontram-se na área ocidental da cidade, correspondente à Serra de Monsanto, onde se registam cotas superiores a 200 m. À exceção da Serra de Monsanto, Lisboa apresenta cotas máximas na ordem dos 120 m a 140 m junto aos limites norte e noroeste do concelho. A sul e a sudeste as cotas variam entre os 70 m e os 100 m, sendo esta a zona morfológicamente mais característica de Lisboa por corresponder às “Sete Colinas”. Esta morfologia consiste no que se formou a partir de uma superfície de erosão onde numerosas linhas de água foram escavando, conduzindo ao aparecimento destas elevações independentes, de vertentes com forte declive e topos aplanados. A norte desta zona, surge um

relevo mais uniforme, o “Planalto de Lisboa”, com cotas entre os 80 m e os 100 m. Na zona oriental, o “Planalto de Lisboa” desce progressivamente na direção do rio Tejo, atingindo uma altitude máxima no Parque da Bela Vista e mínima na zona ribeirinha. As áreas baixas situam-se ao longo de toda a faixa ribeirinha, com cotas inferiores a 10 m, e nas numerosas áreas de vale dispersas pela cidade (Figura – 3). Nestas, à exceção do vale de Alcântara onde existia um curso de água até ter sido construído o caneiro de Alcântara, pensa-se que tenham existido em tempos, pequenos ribeiros de cariz temporário.



**FIGURA 3. OROGRAFIA DA CIDADE DE LISBOA**

Tendo por base a explicação morfológica, é possível individualizar locais onde os principais cursos de água coincidem com as áreas consideradas de maior vulnerabilidade ao risco de inundação. Como principais cursos de água que existiram no passado em Lisboa destacam-se a ribeira de Algés, a ribeira de Alcântara, a zona entre as ribeiras de Alcântara e da Baixa que era percorrida por pequenos cursos de água perpendiculares à linha de costa, a ribeira da Baixa que era resultado da confluência de dois cursos de água distintos, um que vinha da zona da Avenida da Liberdade e outro da Avenida Almirante Reis, pequenos cursos de água

entre o Castelo e Xabregas, orientados para o rio Tejo, a ribeira de Xabregas, a ribeira de Chelas, a ribeira do Vale dos Olivais, a ribeira de Odivelas e o rio Trancão.

O facto de Lisboa se localizar numa área de estuário faz com que a interferência direta do efeito de maré possa apresentar algum significado em termos de risco de inundação, desde que esse fator se encontre conjugado com ventos fortes ou com precipitações intensas. A interferência do efeito da maré pode ser em termos de alagamento do espaço, o que interfere diretamente com a faixa litoral, ou em termos do sistema de saneamento básico, uma consequência que tem efeitos mais alargados.

Uma vez que Lisboa se trata de uma área com elevado índice de construção, e consequentemente impermeabilizada, a interferência no ciclo hidrológico é extremamente significativa. Os condicionalismos impostos pela urbanização e a consequente necessidade de uma drenagem organizada das águas pluviais e residuais conduziram a alterações no traçado das linhas de água primitivas através do encanamento subterrâneo ou correspondente aterro, sendo raros os troços que ainda se encontram visíveis e que apresentam o seu traçado inalterado na totalidade [Oliveira *et al.*, 2005].

## 1.5 Síntese da metodologia aplicada

A utilização de dados LiDAR na determinação de linhas de acumulação de água superficial consistiu na principal inovação conseguida com este projeto. Para tal, a superfície criada a partir dos dados LiDAR, após ser submetida a um tratamento essencial para interpolar os valores negativos, foi sujeita à realização do processo hidrológico disponibilizado pelo *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) no *software* ArcGIS, *Hydrology Tools* [ESRI, 2009], onde sobre a superfície foram determinadas as linhas de acumulação de água e classificadas segundo uma ordem de importância consoante o número de ramificações de cada uma delas, sendo que as classes mais importantes são as que contêm maior número de ramificações.

Teria sido ideal seguir para a construção do modelo hidrológico com estes mesmos dados. Contudo, para criar um modelo hidrológico para toda a cidade tal não foi possível uma vez que os dados LiDAR se cingem a uma zona da cidade, não cobrindo a totalidade desta. Decidiu-se assim criar uma superfície o mais próxima possível a um MDS, utilizando na sua construção, informação disponibilizada pelo SMPC. Assim, construiu-se um modelo de superfície

combinando um Modelo Digital do Terreno (MDT) construído com informação pontual do Modelo Numérico Altimétrico (MNA) e informação altimétrica do edificado existente na cidade. Para comparar se esta superfície, na determinação das linhas de acumulação de água, conduzia a resultados semelhantes aos que foram obtidos a partir do MDS LiDAR, esta foi utilizada no mesmo processo hidrológico a que o MDS LiDAR foi submetido. Também para averiguar as limitações do modelo de superfície relativamente ao MDS LiDAR, foi realizada uma validação por comparação entre as duas superfícies, tanto a nível do terreno como do edificado.

A criação do modelo hidrológico para a cidade foi então realizada com base no modelo de superfície. Foram determinadas as bacias hidrográficas a partir das linhas de acumulação de água e cada bacia foi posteriormente tratada como um projeto isolado. Definiram-se os parâmetros hidrológicos de perda e transformação de água, onde se insere a impermeabilidade, que foi também definida neste projeto, usando informação disponibilizada pelo SMPC.

Estes valores foram posteriormente combinados com uma geometria de secções transversais traçadas sobre o MDT, para permitir o mapeamento das quantidades de acumulação de água em cada zona, para cada cenário.

Os resultados obtidos foram validados através do estudo da correlação espacial existente entre a distância das zonas de acumulação às ocorrências registadas pelo RSB, referentes a inundações ocorridas em dias de precipitação intensa.

## **1.6 Contribuição do trabalho**

Pretende-se com a realização deste projeto definir as áreas que estão mais sujeitas a inundações no concelho de Lisboa e conceder ao SMPC um instrumento de gestão operacional que permita obter respostas rápidas e eficazes a eventos de precipitação anómala com posterior inundações, que possam vir a ocorrer.

O modelo hidrológico proposto, permitirá ao SMPC prever mais eficazmente as zonas da cidade que apresentam maior vulnerabilidade a inundações, o que por conseguinte permite atuar com antecedência, realizando as operações necessárias para atenuar os danos causados pelas inundações na cidade ou até mesmo em determinados locais, evitar que as inundações aconteçam.

## 1.7 Estrutura da tese

Após a apresentação do enquadramento deste projeto, no que respeita aos objetivos propostos e à metodologia seguida descritos neste primeiro capítulo, o presente documento organiza-se em mais quatro capítulos.

Assim, no segundo capítulo faz-se uma revisão bibliográfica de trabalhos anteriormente efetuados sobre a problemática das inundações em meio urbano, a forma como os efeitos causados por estas podem ser minimizados e como as ferramentas SIG podem contribuir para tal.

No terceiro capítulo apresentam-se os fundamentos teóricos que servem de base ao trabalho aqui desenvolvido. São apresentadas as diferenças entre um MDT e um MDS e a forma como cada um deles pode ser construído, a técnica de aquisição de dados LiDAR, a definição de bacias hidrográficas e a forma como se determina e como são considerados os períodos de retorno.

O quarto capítulo refere-se a toda a metodologia que foi seguida para criar o modelo hidrológico assim como à análise dos resultados obtidos. Neste capítulo demonstra-se como a utilização de dados LiDAR e a metodologia usada se adaptam para a determinação de linhas de acumulação de água de toda a cidade. Demonstra-se ainda como é que a partir desta superfície se determinaram para vários cenários de precipitação, a quantidade de água acumulada à superfície, combinando a superfície criada e as linhas de água sobre ela determinadas com informação relativa à impermeabilidade do solo, valores de precipitação e outros parâmetros hidrológicos e hidráulicos. Apresenta-se ainda a validação feita aos resultados obtidos através da correlação espacial existente entre as zonas inundadas e a localização das ocorrências registadas pelo RSB.

O quinto e último capítulo refere as principais conclusões dos resultados, as principais limitações encontradas durante a realização do trabalho e algumas perspetivas futuras de investigação.

## 2. Contexto

### 2.1 Introdução

As inundações nas áreas urbanas requerem uma especial importância, uma vez que interferem no funcionamento comum das sociedades, provocando um grande impacto nas atividades comerciais, nos serviços, na interrupção dos transportes e no alagamento das áreas residenciais [Oliveira *et al.*, 2005].

O estudo desta problemática e a definição de metodologias que permitam analisar a vulnerabilidade de determinadas áreas urbanas ao risco de inundação tem vindo a assumir uma importância cada vez maior em numerosos aspetos, nomeadamente ao nível da prevenção e da emergência em planeamento. Deste modo, é essencial a existência de um conjunto integrado de métodos aplicáveis no estudo da vulnerabilidade ao risco de inundação, consoante os objetivos específicos definidos em cada circunstância, e considerando os limites existentes relativos à quantidade e qualidade da informação hidrológica e não hidrológica disponibilizada.

A evolução tecnológica que tem vindo a surgir ao longo dos tempos, vem possibilitar que a modelação hidrológica seja combinada com a tecnologia SIG, contribuindo este facto decisivamente para a elaboração de diagnósticos ambientais [Faria e Pedrosa, 2005].

Apesar da separação científica existente na forma como os SIG e os modelos de simulação ambiental são construídos, a necessidade contínua de estabelecer um determinado nível de integração entre ambos é conduzida pelo reconhecimento crescente de que a avaliação integrada de todos os aspetos físicos, bióticos, sociais e económico-ambientais, é uma exigência do desenvolvimento sustentável [Ribeiro e Cardoso, 2014].

Em Portugal, os trabalhos desenvolvidos neste sentido são ainda muito escassos, sendo mais frequente a realização de estudos de determinação de áreas vulneráveis ao risco de cheias, associado ao aumento rápido e anormal do leito médio das águas de um curso de água [Pais e Moreira, 2005]. É desta forma necessário que seja prestada mais importância a esta problemática e que sejam definidas metodologias que permitam determinar o risco de inundação em meios urbanos e por conseguinte prever e atenuar o acontecimento das inundações.

### 2.2 Risco de inundação urbana

Qualquer fenómeno natural ou atividade humana pode desencadear situações de risco, definindo-se este como a possibilidade de ocorrência de determinado acontecimento indesejável, expondo as comunidades a consequentes perdas de vidas, bens e degradação do meio envolvente em geral [SMPC, 2001]. A perceção do risco consiste num fenómeno



multidimensional, produto da perigosidade dos elementos naturais económicos e intuição, espelho de valores socioculturais [adaptado de Silva, 2002]. Correia *et al.* [1994] afirmou existir um conjunto de fatores que interferem na perceção da população relativamente a um determinado risco: não só as características físicas do fenómeno, como a frequência, a possibilidade de previsão e de controlo humano, mas também as características da população exposta ao risco como o estatuto socioeconómico, a base cultural, experiências passadas e outras mais individuais como a idade, o grau de instrução e os valores morais individuais. É importante a perceção de uma população face ao risco a que estão expostos, pois quanto mais consciente a população estiver, maior é a possibilidade de o prever e mitigar.

Frequentemente ocorrem circunstâncias imprevistas e dramáticas provenientes de acidentes graves ou catástrofes que muitas vezes destroem vidas, bens e património coletivo [Pais e Moreira, 2005]. Segundo o Decreto-lei nº27/2006, entende-se que um acidente grave se trata de uma ocorrência num espaço geográfico limitado, podendo provocar vítimas, prejuízos económicos de maior ou menor amplitude e que igualmente afete o ambiente. As catástrofes são acontecimentos súbitos, quase sempre imprevisíveis, que afetam um grande número de cidadãos, provocam vítimas, prejuízos materiais avultados, e ultrapassam a capacidade da comunidade atingida para lhe fazer face.

O conceito de inundação é frequentemente confundido com o conceito de cheia e é importante saber distinguir entre as duas situações. Oliveira [2014] afirma que o fenómeno de cheia consiste no alagamento natural resultante da elevação do nível médio das águas dos rios, com conseqüente extravasamento, e que uma inundação consiste no fenómeno de alagamento por outras causas, nomeadamente a incapacidade de escoamento das águas pluviais, ou seja, consiste numa submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água ou na acumulação de água proveniente de drenagens, em zonas que por norma não se encontram submersas. Apesar desta diferença, existe no entanto a possibilidade de ocorrerem simultaneamente as duas situações. As inundações podem por vezes considerar-se conseqüências de uma cheia, mas, em outras ocasiões, uma cheia pode não progredir numa inundação.

As inundações urbanas ocorrem devido às precipitações excessivas, que associadas a um elevado nível de impermeabilização, geram um elevado escoamento superficial, que ultrapassa a capacidade do sistema de drenagem das águas [Oliveira *et al.*, 2005]. Tal como em outros centros urbanos, Telhado [1998] defende que Lisboa é um concelho fortemente vulnerável a situações de risco, quer sejam elas de origem natural ou tecnológica, podendo essas situações

apresentar incidência para além do concelho, como o risco sísmico, ou encontrarem-se circunscritas a áreas específicas, como o risco de inundação.

A intervenção humana na construção e no desenvolvimento das cidades traduz-se num aumento da impermeabilização, o que evidencia grandes alterações na morfologia superficial, assistindo-se à artificialização e canalização das linhas de água naturais e ao aumento da velocidade de escoamento superficial. O facto de Lisboa conter uma rede de coletores maioritariamente unitários agrava também a ocorrência de inundações, pois quando se verificam precipitações mais intensas, os coletores entram em carga, anulando a sua capacidade de receção do caudal afluyente e originando as inundações. A idade, o mau estado de conservação de alguns coletores e os problemas de obturação dos mesmos são também fatores que contribuem para a ocorrência de inundações [Pais e Moreira, 2005].

Segundo Oliveira *et al.* [2005], Lisboa é mais suscetível à ocorrência de inundações nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, ou seja, no período referente à estação do outono, não só devido a precipitações intensas mas também porque depois do período seco estival, as sarjetas não estão devidamente limpas, conduzindo ao entupimento das mesmas.

A conjugação de todos os fatores acima descritos conduz à perceção de que Lisboa é uma cidade cada vez mais propícia à ocorrência de inundações, assistindo-se na atualidade a um aumento da incidência deste risco no concelho [Pais e Moreira, 2005].

## 2.3 Revisão bibliográfica

São inúmeros os estudos realizados no sentido de atenuar a problemática das inundações. No entanto são escassos os que recorrem ao LiDAR e a dados de grande resolução.

Faria e Pedrosa [2005] realizaram a modelação hidrológica de uma secção da bacia hidrográfica do Rio Uíma. Geraram um MDT através de uma amostragem das curvas de nível e eliminaram as imperfeições do modelo, contribuindo para um maior rigor na sua representação da realidade. Sobre este determinaram as linhas de água com base no cálculo das direções de escoamento e das áreas de acumulação onde a cada célula corresponde o valor do número de células a montante que escoam na sua direção. A delimitação da bacia hidrográfica foi feita a partir do conjunto de sub-bacias determinadas tendo em conta as direções de escoamento. A área considerada foi cruzada com informação relativa à impermeabilidade e ocupação do solo e

o espaço foi classificado quanto a estes dois fatores através de percentagens. A cada tipo de ocupação do solo foram atribuídos coeficientes de infiltração, escoamento superficial e evaporação, para analisar os impactos da urbanização no incremento de inundações, concluindo-se que nas áreas impermeabilizadas o escoamento superficial é o fenómeno dominante e que a infiltração pode até ser nula.

Ribeiro e Cardoso [2014] exploraram as potencialidades de *softwares* SIG (ArcGIS e QuantumGIS) na integração de um modelo de simulação hidrológica e hidráulica de sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas, o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM), da autoria da *Environmental Protection Agency* (EPA) dos EUA. Consideraram uma determinada área residencial que foi dividida em sub-bacias para captar melhor a topografia, o tipo de cobertura e outras características do solo necessárias para gerar o escoamento superficial, com o objetivo de simular um sistema de drenagem com duas partes distintas: uma superficial, composta pelas ruas, canais naturais e artificiais, depressões e zonas de acumulação de água, e outra subterrânea, composta pela rede de coletores e as sarjetas. Se a rede de coletores entrar em sobrecarga, a superfície será inundada. Foram analisados 2 cenários diferentes, para um período de retorno fixo de 2 anos e um aumento no diâmetro dos coletores. Para o cenário base não se registou inundação mas alguns coletores entraram em sobrecarga. Para o cenário com diâmetro dos coletores aumentado, os coletores não entraram em sobrecarga. Como num evento de período de retorno de 2 anos não deve haver inundação das sarjetas, considerou-se que o sistema era apropriado em termos de fluxo de água nas ruas. Os resultados obtidos com os dois *software* foram muito semelhantes, no entanto os autores afirmam ser necessário ainda introduzir muitas melhorias nos sistemas que desenvolveram.

Aktaruzzaman [2011] investigou a necessidade de se obter uma representação detalhada da superfície com o intuito de gerar uma superfície viável para simular o escoamento superficial e subterrâneo causado por fortes chuvas. Foi gerado um MDS de alta resolução (< 0.5 m) a partir de dados de LiDAR aéreo, através do qual se fez a deteção de objetos, para separar as árvores e o edificado (pontos não terreno) aplicando filtros morfológicos. De seguida, a separação entre árvores e edificado foi realizada a partir da nuvem de pontos LiDAR aplicando o algoritmo *pseudo-gridding*, de deteção automática, que vai para cada aglomerado detetado, dividi-lo numa grelha de pequenos quadrados e verificar a altura em cada grelha. Se é homogénea na maioria dos quadrados trata-se de edificado, caso contrário trata-se de árvores.

Extraíram-se ainda as estradas a partir dos dados LiDAR e os espaços correspondentes a estacionamentos e outras superfícies pavimentadas através do estudo de assinaturas espectrais de uma imagem multiespectral. Esta individualização visa caracterizar toda a superfície quanto ao tipo de solo para posteriormente, tal informação ser utilizada na criação de um modelo de dupla drenagem (superficial e subterrânea).

*Elberink et al.* [2013] generalizaram uma aproximação a uma grelha altimétrica em que se preservam as características da superfície que mais influenciam o escoamento da água. Começaram por criar um MDS detalhado, combinando dados laser de grande densidade com um mapa de base topográfico detalhado. O mapa foi sujeito a triangulação para uma *Triangular Irregular Network* (TIN), considerando as diferentes classes de objetos existentes no mapa, e foi convertido em duas grelhas *raster* com resolução de 0.5 m: uma referente às classes de objetos e outra referente aos valores altimétricos interpolados através da rede TIN. As grelhas foram posteriormente generalizadas para uma resolução mais baixa utilizando um procedimento que considera o valor/classe de cada célula e os valores/células das células vizinhas. Os resultados foram testados e validados por um modelo de escoamento de águas, o *CityFlood*, para diferentes resoluções altimétricas, considerando uma área de teste. Para o modelo de escoamento foi necessária informação relativa às classes do solo, a informação altimétrica e dados históricos de precipitação, de onde resulta, de forma dinâmica, quais são os locais por onde a água vai escoar quando a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração (Figura – 4). Os autores defendem que esta pesquisa confirma a ideia de que a informação topográfica referente a limites e classes de objetos da superfície, podem enriquecer uma grelha altimétrica para ser utilizada numa aplicação hidrológica.

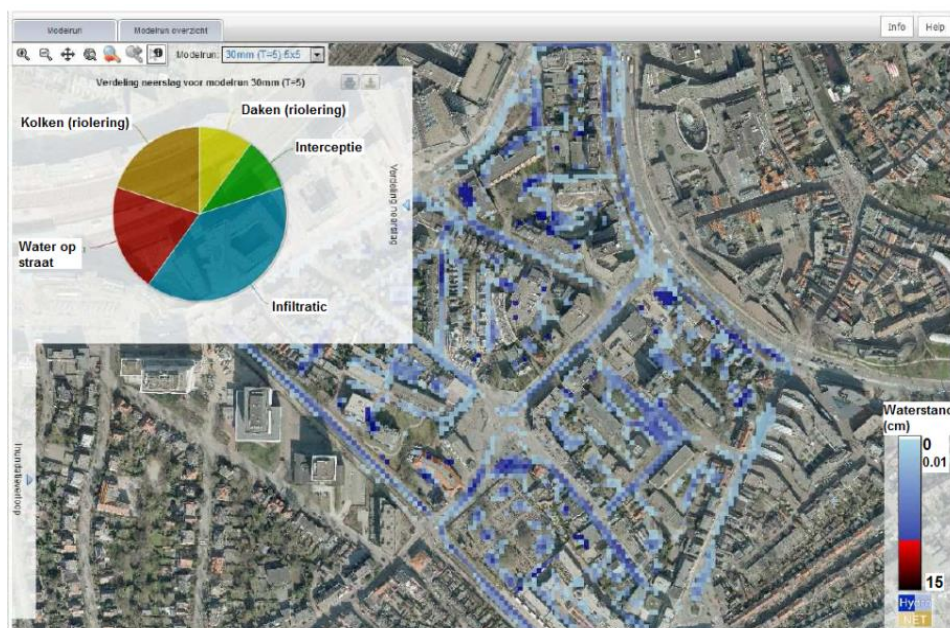


FIGURA 4. RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO *CITYFLOOD* [ELBERINK ET AL., 2013]

*Birth e Braswell [2011]* mostraram a forma como o *San Francisco Department of Public Works* utilizou um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução (1 m) para estudar a hidráulica das águas pluviais urbanas. Para automatizar o processo de captação das linhas de escoamento de água, os autores criaram um *script* no *ModelBuilder* do ArcGIS que utiliza o *raster* MDE e se baseia no método dos percursos mais íngremes.

*Arthur et al. [2008]* criaram dois modelos 1D em *InfoWorks CS*, um considerando um MDE LiDAR e outro considerando um MDE de referência com resolução de 1 m, para avaliar o efeito dos erros não corrigidos nos MDE LiDAR, no comportamento das inundações urbanas. Esses modelos foram ainda comparados com um modelo 2D, o TUFLOW, para comparar o uso de modelação 1D e 2D. Concluíram que o modelo 1D que utiliza os dados de referência e o modelo 2D são os que obtiveram resultados mais idênticos, uma vez que ambos foram modelados utilizando o MDE de referência. No entanto, as comparações realizadas entre os dois modelos 1D forneceram bons resultados, mostrando que existe potencial para os MDE LiDAR serem utilizados na determinação das zonas de inundação em meio urbano.

*Mosuro [2012]* desenvolveu um modelo de propagação do fluxo para a cidade de Lagos, na Nigéria, tratando-se este de um modelo hidrológico que utilizou dados relativos à elevação (MDS LiDAR), uso do solo e dados de precipitação. Os objetivos do seu trabalho consistiram em perceber até que ponto um MDS LiDAR podia ser utilizado na modelação hidráulica de fluxos em perfis transversais e na determinação da influência das estruturas na propagação, velocidade e profundidade das inundações.

Analisou também a forma como os indicadores de vulnerabilidade à inundação podem ser modelados e divulgados rapidamente para que possam contribuir na resposta às inundações, no planeamento de emergência, no planeamento urbano e na validação e refinamento do próprio modelo. A metodologia utilizada para a criação deste projeto utilizou ferramentas do *Hydrology Engineering Centre (HEC)* e encontra-se esquematizada na Figura – 5.

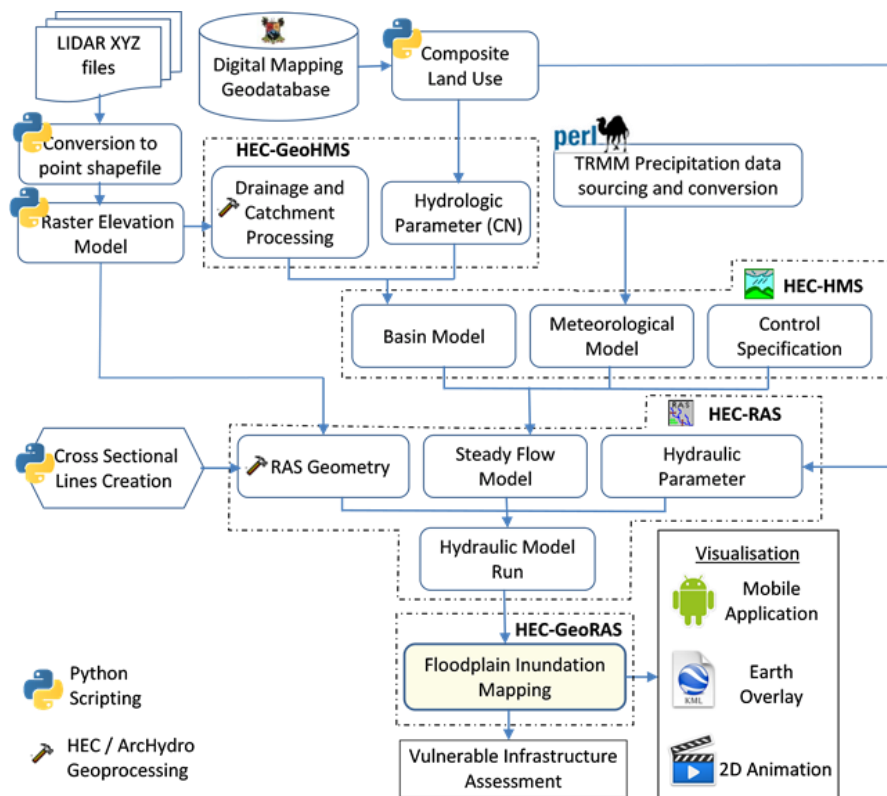


FIGURA 5. ESQUEMATIZAÇÃO DO PROJETO DE MOSURO [MOSURO, 2012]

### 2.3.1 Análise crítica dos estudos investigados

Dos estudos analisados concluiu-se que existem alguns estudos relacionados com o problema das inundações, no entanto são muito escassos os que combinam informação de alta resolução para o desenvolvimento de modelos hidrológicos.

O trabalho desenvolvido por Faria e Pedrosa [2005] consistiu na determinação das linhas de água para a zona de estudo e os resultados foram posteriormente cruzados com valores de impermeabilidade, mas acabou por não ser criado nenhum modelo hidrológico. Para além disso, o estudo foi realizado sobre um MDT e não sobre um MDS, do qual é desconhecida a resolução.

Ribeiro e Cardoso [2014] fizeram um estudo mais centrado na comparação da forma como o modelo dinâmico de precipitação – escoamento se integrava no *software* ArcGIS e no *software* QuantumGIS, não sendo feita referência à resolução da informação de base utilizada nem ao facto de ser um MDT ou um MDS, dando mais ênfase aos detalhes da rede de coletores utilizada.

*Aktaruzzaman* [2011] utilizou no seu estudo um MDS de alta resolução. Contudo o seu trabalho foi mais direcionado para a aplicação de filtros ao MDS para separar a informação por classes, para serem posteriormente utilizadas num modelo hidrológico, do que propriamente na integração dessa informação no modelo hidrológico e na análise dos resultados obtidos através do mesmo.

O trabalho desenvolvido por *Elberink et al.* [2013] é um dos que mais se enquadra no pressuposto deste trabalho, uma vez que utiliza como dados de base um MDS LiDAR de alta resolução, juntamente com informação relativa às classes do solo e dados de precipitação, no funcionamento de um modelo dinâmico de escoamento, de onde resulta o mapeamento dos locais por onde a água vai escoar no caso de ocorrer uma inundação.

De forma idêntica foi realizado o projeto de *Birth e Braswell* [2011], que utilizaram também um MDE de alta resolução e automatizaram um processo de captação das linhas de escoamento de água. No entanto o seu trabalho não é muito específico quanto ao desenvolvimento do modelo hidrológico.

O projeto de *Arthur et al.* [2008], apesar de ter utilizado um MDE LiDAR com resolução de 1 m, centrou-se mais na comparação entre modelos de 1D e 2D, utilizando MDE LiDAR e MDE de referência.

O estudo de *Mosuro* [2012] foi considerado o mais pertinente para este trabalho pois recorreu à utilização de dados LiDAR de alta resolução para criar um modelo hidrológico de onde resultou o mapeamento de inundações para determinados cenários de precipitação. Entre este trabalho e o de *Elberink et al.* [2013], optou-se por aproximar a metodologia deste trabalho à metodologia utilizada por *Mosuro* [2012] uma vez que o seu trabalho tinha uma explicação mais perceptível e detalhada que o trabalho de *Elberink et al.* [2013].

Desta forma consegue-se mostrar que a aplicação de MDS de alta resolução a modelos hidrológicos é uma metodologia que ainda pode ser muito explorada e que uma boa execução de um modelo hidrológico deste género pode conduzir a soluções muito credíveis para a gestão das inundações urbanas.

### 3. Fundamentação teórica

#### 3.1 Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Os MDE são superfícies digitais que representam o relevo existente na superfície terrestre. Consistem em funções contínuas em que a cada ponto de coordenadas planimétricas  $X,Y$ , é associado um e um só valor da altitude correspondente [Matos, 2008]. Quanto melhor for a qualidade e maior a densidade da amostra de pontos cotados utilizados na sua criação, mais preciso será o MDE construído.

Os MDT e os MDS são ambos considerados MDE [Redweik, 2012]. Os primeiros representam o relevo ao nível do terreno enquanto os segundos consistem em representações da superfície que englobam o edificado e as infraestruturas, assim como as árvores existentes sobre o terreno (Figura – 6).

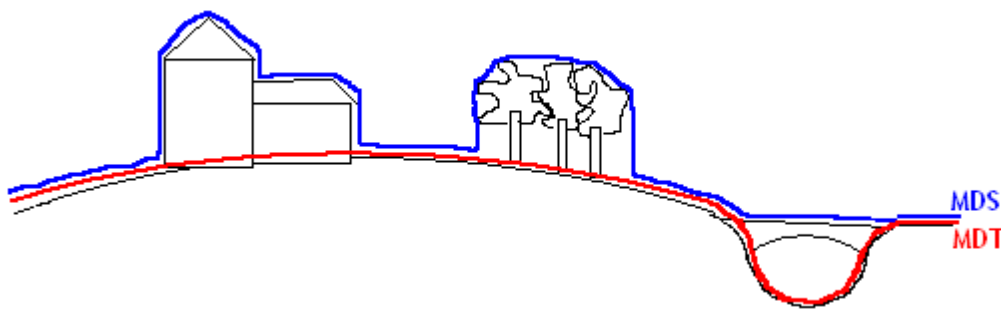


FIGURA 6. DIFERENÇA ENTRE MDT E MDS

Segundo Falcão [2012], sobre estes modelos podem ser realizadas várias operações tais como o cálculo de volumes, a análise de perfis de secções transversais, a geração de mapas de declives, exposição e de drenagem, operações que são essenciais nas tarefas de planeamento, ordenamento, elaboração e implantação de projetos.

A representação do relevo pode ser feita com base em curvas de nível, linhas de cota constante e orientação variável no plano  $XY$ , perfis, linhas de orientação constante no plano  $XY$  e com cota variável, conjuntos de pontos cotados de distribuição regular ou irregular no plano  $XY$ , ou numa superfície continua multifacetada composta por planos adjacentes de orientação espacial variável ou por um conjunto de superfícies de curvatura variável limitadas por figuras geométricas regulares no plano  $XY$  [Redweik, 2012].

Matos [2008] afirma que em todas as formas de construção dos MDT existe propagação da altitude conhecida num dado conjunto de pontos, para outros quaisquer pontos da região a



integrar no modelo, propagação essa que é realizada através de métodos de interpolação. O formato TIN e o formato GRID destacam-se como forma de estruturação dos dados nas metodologias de realização dos MDE.

O processo mais frequente, o modelo TIN, baseia-se na triangulação de uma amostra de pontos cotados com distribuição irregular, sendo ela proveniente diretamente de medições realizadas sobre o solo ou extraída indiretamente de curvas de nível ou perfis restituídos. A partir da amostra de pontos é gerada uma rede de triângulos cujos vértices vão corresponder aos pontos cotados da amostra (Figura – 7). Por último, geram-se superfícies planas limitadas por cada um dos triângulos e a cota de cada ponto X,Y, incluído no terreno será definida pela cota do ponto na face triangular em que este se insere [Redweik, 2012].

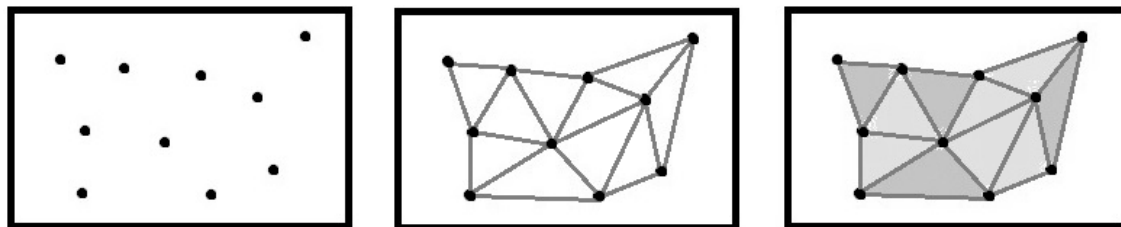


FIGURA 7. ETAPAS DO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DE UM MODELO TIN

A rede de triângulos criada a partir da amostra tem de seguir certos critérios para uma melhor adaptação à distribuição local e geral dos pontos da amostra. O método utilizado mais frequentemente é o da triangulação de *Delaunay* [Redweik, 2012] em que os triângulos são definidos para que o círculo que passa pelos três vértices de qualquer triângulo, não contenha nenhum outro ponto da amostra no seu interior.

Segundo Matos [2008], a superfície TIN é por si mesma um MDT, mas também é um suporte habitual para a construção de modelos com outro tipo de estrutura, como por exemplo os modelos matriciais. Desta forma, um modelo GRID é também gerado a partir de uma amostra primária de pontos cotados. Neste caso, os procedimentos são diferentes consoante a distribuição espacial da amostra seja regular ou irregular. Se se tiver uma amostra de pontos irregular, o processo tem de passar primeiro pela criação de um modelo TIN, a partir do qual se interpolam depois as cotas de pontos regularmente espaçados, com os quais se cria então o modelo GRID. Se se tiver uma amostra de pontos regular, pode-se gerar o modelo GRID diretamente a partir desta. Este pode ser composto por células regulares de cota constante no seu interior, com a mesma cota do ponto da amostra, ou pode ser construído por uma malha regular cujos nodos são os pontos da amostra com as respetivas cotas. No primeiro caso, a cota

de cada ponto é determinada pela cota da célula onde este se insere, no segundo caso, por interpolação numa superfície curva que se adapte às cotas dos nodos da malha onde o ponto está inserido e, por vezes, das malhas vizinhas [Redweik, 2012].

Comparando as duas superfícies, o modelo TIN é vantajoso por se adaptar facilmente a qualquer tipo de amostra primária, no entanto apresenta uma estrutura muito complexa. Por outro lado, o modelo GRID, tem uma estrutura muito simples mas tem dificuldade em se adaptar a qualquer tipo de amostra primária, obrigando a que se derive uma amostra secundária a partir de um TIN.

Segundo Matos [2008], existem 3 problemas fundamentais no domínio dos MDT que se devem considerar:

(1) A melhor forma de modelar um fenómeno geográfico com distribuição contínua, nomeadamente sob a forma de dados matriciais ou estruturas vetoriais.

(2) A quantidade de informação necessária para modelar um fenómeno para que os resultados sejam suficientemente próximos da realidade e diminuindo a importância da interpolação.

(3) As dificuldades de processamento de um elevado volume de dados, uma vez que um modelo de terreno pode facilmente ultrapassar 1Gb (a representação do território nacional com células espaçadas de 25 em 25m ultrapassa os 2Gb), repetindo-se este valor sempre que é gerada uma matriz auxiliar ou derivada como a matriz de declives ou direções de escoamento.

Estes modelos têm atualmente um papel essencial nas áreas da cartografia, engenharia civil, hidrografia, gestão de recursos naturais e proteção civil [Matos, 2008] sendo o desenvolvimento de representações numéricas do terreno a partir dos MDE de alta resolução, um dos desafios mais importantes nos estudos de cariz ambiental.

### **3.2 *Light Detection and Ranging (LiDAR)***

O LiDAR, também designado por *laser-scanning*, é um método baseado na medição de distâncias através da emissão e receção de um feixe laser. Trata-se de uma tecnologia que permite adquirir grandes volumes de dados com alta resolução, a uma velocidade relativamente grande quando comparado a outras tecnologias. Contudo, os dados adquiridos consistem em dados geométricos discretos e irregulares e é necessário serem submetidos a várias operações para que deles se possa extrair informação sobre o objeto ou a superfície submetidos ao varrimento [Falcão, 2012].

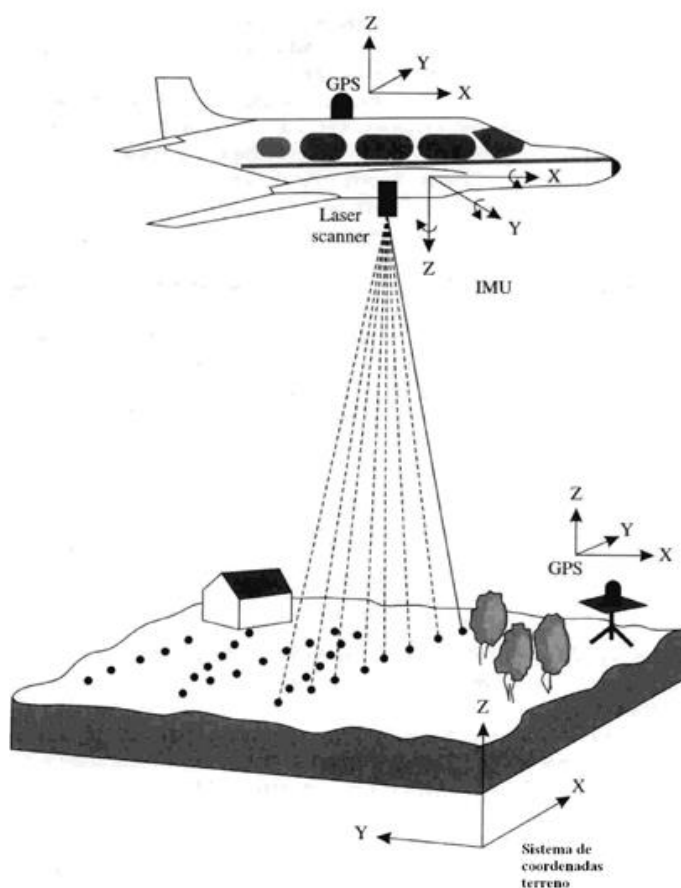
Este método requer a realização de um voo, por um avião equipado com um dispositivo emissor de um feixe de raios laser, que à medida que o avião se desloca, oscila e emite impulsos laser para a superfície terrestre [Redweik, 2012]. Ao atingir cada ponto da superfície, o feixe é refletido e captado novamente pelo dispositivo, e o intervalo de tempo entre a emissão e a receção do feixe, multiplicado pela velocidade da luz, fornece a dupla distância que existe entre o dispositivo emissor e o ponto à superfície [Yunjae Choung, 2009]. O laser é um sensor ativo e tem a vantagem de não sofrer interferência pela falta de iluminação nem distorções, como acontece nas fotografias aéreas [Sanhueza, 2007].

O avião está ainda equipado com um sistema GPS/IMU (*Global Positioning System / Inertial Measuring Unit*) permitindo a determinação, a cada momento, da posição espacial do emissor e também a orientação do feixe, possibilitando desta forma o cálculo das coordenadas tridimensionais de cada ponto à superfície, o que vai permitir gerar o MDS [Redweik, 2012].

O sistema LiDAR divide-se em dois tipos de plataformas: *Airborne Laser Scanning* (ALS) e *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) [Falcão, 2012]. No sistema ALS, o equipamento é instalado numa plataforma móvel aérea em contacto direto com o exterior e de forma a que o equipamento laser esteja direcionado para o nadir. Um avião utilizado para câmaras aéreas ou um helicóptero são por norma os tipos de plataformas utilizadas. Para além do emissor de feixes laser, do recetor do sinal refletido e do sistema GPS/IMU, o equipamento é ainda composto por um defletor óptico ou eletrónico que visa desviar os feixes para diferentes direções da de saída do emissor e por um codificador de ângulo de saída do feixe associado ao defletor [Redweik, 2012].

O sistema IMU de alta precisão permite fornecer os dados de atitude da plataforma (3 ângulos) e o GPS com alta taxa de aquisição permite determinar para o momento de cada impulso as coordenadas do ponto origem do impulso. Durante a fase de execução do levantamento é ainda necessária a colocação de um recetor GPS no terreno, junto à zona do levantamento e sobre um ponto de coordenadas conhecidas, para permitir coordenar a trajetória da plataforma por posicionamento diferencial e para permitir efetuar a ligação ao datum no qual se pretendem os resultados [Redweik, 2012].

Os varrimentos são realizados perpendicularmente à direção do movimento da plataforma (Figura – 8) e um único pulso laser permite a reflexão de múltiplos alvos que se encontrem na sua linha de visão, podendo o sensor laser receber múltiplas reflexões ou retornos de um mesmo pulso, o que normalmente se verifica em zonas arborizadas. Tal recurso permite obter medições diretas do solo mesmo em regiões mais cobertas por vegetação [Morin, 2002].



**FIGURA 8. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA LIDAR**

Segundo Redweik [2012] a combinação dos dados obtidos pelos vários dispositivos, sincronizados para um determinado instante  $t$  correspondente ao momento em que é emitido o feixe laser, permitem determinar as coordenadas polares do ponto no solo que refletiu o impulso: origem, direção e distância. As coordenadas cartesianas de cada ponto captado podem ser calculadas através da seguinte fórmula:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xo(t) \\ Yo(t) \\ Zo(t) \end{bmatrix} + R_w(t)\varphi(t)k(t) \begin{bmatrix} 0 \\ s(t)\sin\alpha(t) \\ s(t)\cos\alpha(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde  $\alpha$  representa um ângulo fornecido pelo codificador de ângulo, com origem na vertical da plataforma.

Para a fórmula ser válida é necessário considerar as translações das origens do IMU e do GPS relativamente à origem dos impulsos laser e o desalinhamento dos sistemas de eixos IMU, do codificador de ângulo e do sistema de coordenadas objeto  $X, Y, Z$ . Tais quantidades são constantes ao longo do levantamento e determinadas por calibração do sistema.

O sistema LiDAR é desta forma considerado como uma das técnicas mais inovadoras para a obtenção de coordenadas de pontos na superfície terrestre e para posterior criação dos MDS.

### 3.3 Limites de precipitação anómala

A queda de fortes precipitações associa-se frequentemente à passagem de sistemas frontais ou de Baixas Pressões quando ativas – normalmente perturbações nas massas de ar quente e húmido, com grande conteúdo de precipitação. É um cenário característico do estado do tempo nas estações do Outono e Inverno, período onde normalmente se têm registado um maior número de dias com tempo instável, nebulosidade e precipitações frequentes e abundantes [SMPC, 2009].

Para se perceber o estado de tempo específico responsável pelo comportamento do regime pluviométrico, com significado em termos de risco de inundação, para Lisboa, é necessário definir o que se entende por precipitação anómala. Informação disponibilizada pelo IPMA ao SMPC permitiu concluir que durante o ano, para Lisboa, registam-se valores de precipitação média total na ordem dos 660 mm a 760 mm, registando-se os maiores valores mensais durante o mês de novembro (102 mm na estação Geofísico e 160 mm na estação Gago Coutinho). Dezembro, janeiro e fevereiro são também meses muito chuvosos, com valores de precipitação média mensal superiores a 86 mm [SMPC, 2009].

A precipitação considerada anómala para a cidade de Lisboa foi determinada através da expressão adaptada de Peixoto (1987) definida por períodos temporais pré-definidos:

$$R > 4.2 + 0.08 \Delta t \quad (2)$$

Em que R corresponde à quantidade de precipitação (mm) e  $\Delta t$  ao tempo de duração. Através desta expressão definem-se os limites mínimos de valores de precipitação considerada anómala, consoante os intervalos de tempo (Tabela – 1).

**TABELA 1. LIMITES MÍNIMOS DE PRECIPITAÇÃO ANÓMALA PARA DETERMINADOS INTERVALOS DE TEMPO**

Período temporal	Precipitação (mm)
5 min	>4.6
10 min	>5.0
15 min	>5.4
30 min	>6.6

60 min	>9.0
2 h	>13.8
6 h	>33.0
24 h	> 119.4

Porém, essa expressão não se encontra associada a nenhum período de retorno que indique a média expectável com que estas precipitações anómalas ocorrem.

Para se perceber os períodos de retorno, ou seja, a probabilidade de determinado evento de precipitação anómala voltar a ocorrer, recorreu-se às curvas de Intensidade – Duração – Frequência (I-D-F), que determinam para uma dada estação meteorológica, a relação que existe entre a intensidade de precipitação máxima média e o tempo de duração da chuvada, associada a um determinado período de retorno.

As curvas I-D-F são do tipo exponencial [Brandão *et al.*, 2001]:

$$i = aD^b \quad (3)$$

em que  $i$  representa a intensidade de precipitação (mm/min),  $D$  corresponde à duração da chuvada (min) e  $a$  e  $b$  são os parâmetros resultantes do ajustamento entre as intensidades de precipitação e as durações, associadas a um dado período de retorno, pelo método dos mínimos quadrados (Tabela – 2).

**TABELA 2. VALORES DOS PARÂMETROS A E B PARA VÁRIAS DURAÇÕES E VÁRIOS PERÍODOS DE RETORNO**

Período retorno (anos)	Estação meteorológica Geofísico						Estação meteorológica Gago Coutinho					
	IDF (5min-30 min)		IDF (30 min-6 h)		IDF (6 h – 48 h)		IDF (5min-30 min)		IDF (30 min-6 h)		IDF (6 h – 48 h)	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
2	176.46	-0.529	251.82	-0.628	362.78	-0.698	187.70	-0.516	359.15	-0.711	474.64	-0.756
5	214.32	-0.499	345.32	-0.645	545.58	-0.721	294.15	-0.555	417.04	-0.665	763.29	-0.764
10	239.69	-0.186	407.36	-0.637	670.81	-0.732	365.58	-0.571	461.54	-0.647	955.11	-0.767
20	264.16	-0.477	466.92	-0.639	792.97	-0.739	434.48	-0.581	506.26	-0.634	1139.40	-0.769
50	295.96	-0.467	544.07	-0.641	965.23	-0.747	524.03	-0.592	565.82	-0.623	1378.10	-0.771
100	319.86	-0.461	601.92	-0.642	1074.5	-0.752	591.31	-0.598	611.24	-0.616	1557.10	-0.772
500	375.21	-0.451	735.65	-0.644	1357.3	-0.76	747.18	-0.608	717.68	-0.605	1970.90	-0.773
1000	399.04	-0.447	793.16	-0.645	1479.8	-0.762	814.30	-0.611	763.86	-0.602	2148.80	-0.774

Dos diferentes períodos estudados para avaliar a vulnerabilidade de Lisboa face ao risco de inundação (períodos de 5, 10, 15, 30, 60, 120 e 360 minutos), o período de 30 minutos e o de 60 minutos mostraram-se os mais significativos por concentrarem mais de 50% do total de registos de precipitação. Por outro lado, os períodos de registos de valores de precipitação superiores a 1 hora ou coincidentes com os 5 min revelam-se pouco expressivos na análise da vulnerabilidade ao risco de inundação [SMPC, 2009].

### 3.4 Bacias hidrográficas

Numa bacia de drenagem o ciclo hidrológico consiste numa sequencia de etapas interligadas entre si, pelas quais a água passa da superfície terrestre para a atmosfera, na forma de vapor, por fenómenos de evapotranspiração e transpiração, voltando novamente ao seu ponto de partida, sob a forma líquida e/ou sólida, pela precipitação [adaptado de Lencastre e Franco, 1984]. No solo, a água que não é interceptada, vai escoar à superfície ou infiltrar-se até atingir os locais preferenciais de escoamento, designados por linhas de água. Assim, consideram-se como principais componentes do ciclo hidrológico: a precipitação, a evaporação, o escoamento superficial, a infiltração, o escoamento subterrâneo e a transpiração. Todos eles se interligam através das seguintes relações [adaptado de Lencastre e Franco, 1984]:

$$\text{Balanço hidrológico total:} \quad P - (R+G+E+T) = \Delta S \quad (4)$$

$$\text{Balanço hidrológico superficial:} \quad P+R_g - (R+Es+Ts+I) = \Delta S_s \quad (5)$$

$$\text{Balanço hidrológico subterrâneo:} \quad I - (G+R_g+E_g+T_g) = \Delta S_g \quad (6)$$

Em que:

P = Precipitação que atinge a superfície

G = Escoamento subterrâneo

T = Transpiração

R<sub>g</sub> = Escoamento subterrâneo

Es = Evaporação das águas superficiais

Ts = Transpiração de águas superficiais

ΔS<sub>s</sub> = Armazenamento subterrâneo

R = Escoamento superficial

E = Evaporação

I = Infiltração

E<sub>g</sub> = Evaporação das águas subterrâneas

T<sub>g</sub> = Transpiração de águas subterrâneas

ΔS = Variação total

ΔS<sub>g</sub> = Armazenamento superficial

Para o estudo em questão, as componentes que apresentam maior expressividade são a precipitação e o escoamento superficial.

Segundo Matos [2008] existem diversos algoritmos para determinar linhas de água com base em MDEs do tipo GRID, sendo o procedimento mais comum a determinação da matriz de

direções de escoamento, seguindo-se a matriz de acumulação de escoamento. Com base nesta última, identificam-se como células de linhas de água, as células que drenam de um número de células superior a um valor dado. Um algoritmo que não segue este princípio baseia-se numa “janela” de 4\*4 células que percorre a matriz de cotas abrangendo todos os conjuntos de 4\*4 células. Segundo este, para determinar as linhas de água, assinala-se a célula mais alta de cada conjunto de 16 e após percorrer completamente a matriz de cotas, desenha-se uma estrutura linear sobre as células não assinaladas. Essa estrutura representa a rede de drenagem. A delimitação das bacias hidrográficas é estabelecida pela linha de separação das águas, limite esse que separa a precipitação que cai nessa bacia da que cai nas bacias adjacentes, e que encaminha o escoamento superficial para um ponto terminal designado por ponto de foz da bacia.

### 3.5 Integração de ferramentas SIG na modelação hidrológica

Os modelos hidrológicos definem-se como representações matemáticas do fluxo de água e dos seus componentes, em determinados locais à superfície da terra ou subterrâneos [adaptado de *Maidment*, 1993]. Podem ser considerados programas autónomos em que a inserção e exportação dos dados realizam-se dentro do próprio modelo, ou podem estar interligados a um sistema SIG, através de uma interface desenvolvida para o efeito [*Al-Sabhan et al.*, 2003].

Os SIG focam-se nas representações da localização, na distribuição espacial dos fenómenos geográficos e nas relações entre estas e o espaço. Por norma são representações de carácter estático. Por outro lado os modelos hidrológicos tratam de quantidades variáveis no tempo. Com a integração dos SIG estes podem mais facilmente passar do tratamento unidimensional das bacias de drenagem para uma abordagem de parâmetros espacialmente distribuídos. Desta forma, o cálculo de declives e a orientação de encostas, a delimitação das bacias, a discretização do tipo e uso do solo, o cálculo da interpolação de parâmetros com base em amostragens e a delimitação dos limites de inundação, são bastante facilitados devido à utilização das ferramentas SIG [Ribeiro e Cardoso, 2014].

A integração dos modelos de simulação ambiental, onde se inserem os modelos hidrológicos, dentro dos SIG, tem beneficiado muito com os avanços nas linguagens de programação suportadas pelos SIG e com as ferramentas que estes disponibilizam para facilitar o uso dessas linguagens [Ribeiro e Cardoso, 2014].

Existem modelos hidrológicos que são mais dependentes dos SIG e outros que são menos dependentes. Nos modelos menos dependentes, a ligação ao SIG é realizada através de



um modelo externo onde as operações são realizadas com recurso a linguagens de programação como C e FORTRAN, adequadas para os cálculos matemáticos necessários. Este método por norma envolve um modelo SIG padrão e um modelo hídrico. Contudo, existe a desvantagem de não existir nenhuma interface gráfica comum e a conversão de dados entre o modelo hidrológico e o SIG pode tornar-se complicada [Al-Sabhan *et al.*, 2003].

Os modelos que têm uma ligação mais forte com o SIG são inteiramente desenvolvidos dentro de um ambiente SIG através do uso de uma linguagem macro como por exemplo AML (ESRI Arc Macro Language). No entanto este tipo de programação por vezes não tem capacidade de implementar aplicações complexas. Estes modelos consistem em programas complexos e implicam uma grande quantidade de programação e de gestão de dados, e uma interface de utilizador baseada em menus personalizados para exibição, e que possam interagir com as estruturas de dados do sistema SIG. [Al-Sabhan *et al.*, 2003].

Em geral, pode concluir-se que apesar da existência da modelação ambiental dentro dos SIG, o papel destes na modelação hidrológica tem sido essencialmente para pré-processamento de dados espaciais, assistência nas tarefas de modelação e no pós-processamento dos resultados [Ribeiro e Cardoso, 2014], mas a modelação da informação em si, e a obtenção dos resultados das inundações, é conseguido através do modelo ambiental.

## 4. Metodologia e análise dos resultados

### 4.1 Introdução

Todo o processo metodológico aplicado a este projeto encontra-se esquematizado na Figura - 9. A primeira etapa consistiu na utilização de um MDS criado a partir de dados LiDAR de uma parte da cidade de Lisboa, que após ser submetido a um tratamento dos dados, foi sujeito ao modelo hidrológico disponibilizado pela ESRI no *software* ArcGIS, com o intuito de perceber se o MDS LiDAR conduz a resultados aceitáveis na determinação das linhas de acumulação de água, uma vez que consiste numa representação muito detalhada da superfície terrestre, contendo todos os objetos que obrigam ao desvio do curso da água das chuvas.

Para obter uma superfície idêntica a um MDS para toda a cidade, construiu-se um Modelo de Superfície através da combinação de um MDT com a informação altimétrica do edificado existente na cidade. Este Modelo de Superfície foi sujeito ao mesmo processo hidrológico que o MDS LiDAR para perceber se pode ser utilizado para o substituir, para que se possam determinar as linhas de acumulação de água para toda a cidade e não apenas para uma parte desta. Foi também feita uma validação do Modelo de Superfície com o MDS LiDAR para se detetarem as limitações que o Modelo de Superfície apresenta relativamente ao MDS LiDAR.

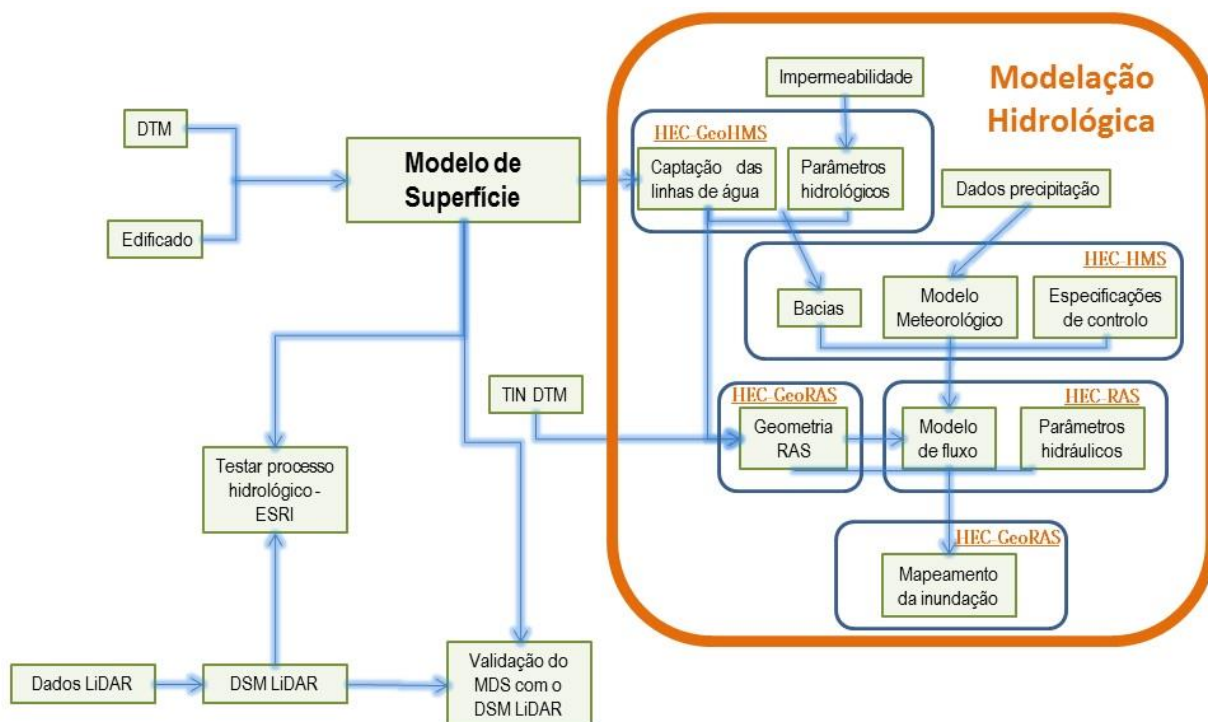


FIGURA 9. FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA APLICADA

O Modelo de Superfície foi então utilizado para criar o modelo hidrológico para a cidade de Lisboa, combinando as principais linhas de acumulação de água com a informação relativa à impermeabilidade dos solos e com outros parâmetros hidrológicos de perda e transformação da água. Os valores de precipitação foram inseridos no modelo, considerando vários cenários de ocorrência de precipitação e determinando assim a quantidade de água acumulada à superfície, para cada cenário, informação que foi por último convertida em mapas de inundação da cidade.

Cada uma destas etapas é explicada detalhadamente ao longo deste capítulo.

As especificações relativas a todos os dados que foram utilizados neste processo encontram-se expressas no ponto seguinte.

## 4.2 Especificações dos dados utilizados

Nesta fase do projeto apresentam-se todos os dados iniciais que foram utilizados na criação do modelo hidrológico. Para toda a informação usada apresenta-se na Tabela - 3 algumas das suas características: o ano da sua criação, o sistema de coordenadas de origem de cada um, a origem, ou seja, de onde é que os dados são provenientes, e ainda o objetivo pelo qual foram utilizados. O pré-processamento aplicado a cada um deles, quando aplicado, encontra-se descrito neste capítulo respetivamente com a descrição da metodologia.

**TABELA 3. ESPECIFICAÇÕES DOS DADOS UTILIZADOS**

<b>Dados</b>	<b>Ano</b>	<b>Sistema de coordenadas</b>	<b>Origem</b>	<b>Propósito</b>
<b>MDS gerado com os dados LiDAR</b>	2006	PT-TM06/ETRS89	LÓGICA – obtidos com uma densidade de 20 pontos por m <sup>2</sup> e reamostrados para 1 ponto por m <sup>2</sup>	Testar a criação de linhas de água sobre MDS LiDAR
<b>Informação pontual do MNA (dados provisórios)</b>	2013	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Criação do Modelo de Superfície

<b>Edificado (polígonos) com informação do número de pisos</b>	2014	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Determinação da elevação dos edifícios para integrar no modelo de superfície e integração na carta de impermeabilização
<b>Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP)</b>	2013	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Utilizada sempre que necessária a definição dos limites administrativos de Lisboa
<b>Pontos cotados de Loures</b>	2014	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Cedidos pela Câmara Municipal de Loures	Criação do Modelo de Superfície
<b>Bases Geográficas de Referenciação de Informação (BGRI) de Lisboa e Loures</b>	2011	PT-TM06/ETRS89	Instituto Nacional de Estatística (INE)	Subdivisão de freguesias na criação do modelo de superfície e classificação de espaços para a carta de impermeabilização
<b>Rede Viária</b>	2014	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Integração na carta de impermeabilização
<b>Rede Ferroviária</b>	2013	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Integração na carta de impermeabilização
<b>Cemitérios</b>	2013	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Integração na carta de impermeabilização
<b>Estacionamentos</b>	2013	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Integração na carta de impermeabilização
<b>Espaços verdes de Lisboa</b>	2013	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Integração na carta de impermeabilização

<b>Áreas de intervenção da Direção Municipal de Ambiente Urbano (DMAU)</b>	2013	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Integração na carta de impermeabilização
<b>Ocorrências do RSB</b>	2013	Datum 73 Hayford - Gauss IPCC	Servidor da CML	Validação dos resultados obtidos

### 4.3 Utilização de dados LiDAR

#### 4.3.1 Tratamento de dados LiDAR

A área coberta pelos dados LiDAR consiste numa zona da cidade de formato aproximadamente retangular, com uma extensão de 6.25 km \* 5.14 km, o que corresponde a uma área de cerca de 32 km<sup>2</sup>, aproximadamente 40 % da área do concelho [Dias, 2013]. Esta zona é delimitada a norte pela zona do aeroporto de Lisboa, a Este pelo rio Tejo, a Sul pela zona da cidade onde se situa o castelo de S. Jorge e a Oeste pela Serra de Monsanto. Trata-se de uma zona bastante urbanizada da cidade, englobando espaços habitacionais e comerciais e também uma parte da zona mais histórica da cidade com construções mais antigas.

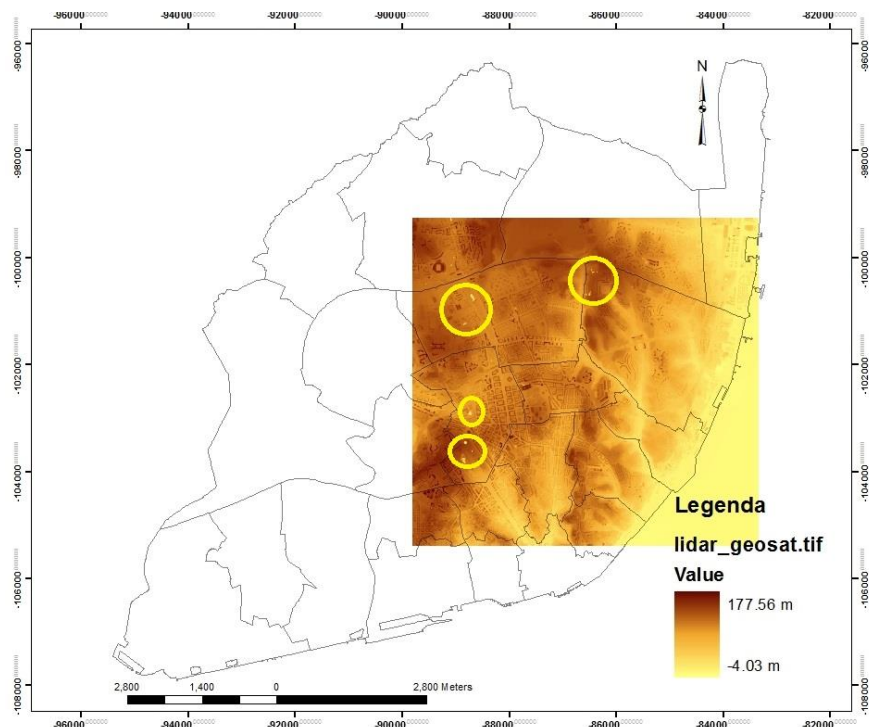


FIGURA 10. MDS LiDAR

Durante a aquisição dos dados, na fase do voo fotogramétrico, os impulsos laser emitidos que incidem sobre locais constituídos por água (mares, rios, lagos, lagoas, poças de água, etc.), vão transmitir ao dispositivo de aquisição um valor de elevação incorreto (Figura – 10), devido ao *laser scanner* de radiação infravermelha não ter reflectância na água, especialmente quando se trata de águas paradas [Korzeniowska, 2012]. Para permitir modelar o escoamento superficial da água da chuva, é necessário realizar uma correção desses valores para as células que dizem respeito a lagos, lagoas, poças de água e outras superfícies do mesmo género, existentes na cidade.

O MDS criado a partir dos dados LiDAR adquiridos, com valores entre -4,03 m e 177,56 m (Figura – 10), teve de ser dividido em várias partes retangulares, uma vez que o ficheiro original não é suportado pelo *software* para realizar os procedimentos necessários. Assim, o ficheiro original foi dividido em 12 partes, utilizando a CAOP para realizar as divisões, tendo em conta as freguesias do concelho de Lisboa nele contidas e área de cada uma delas: Areeiro, Beato, Campolide e Avenidas Novas, Lumiar, Marvila, Olivais, Parque das Nações, Campo de Ourique e Estrela, Santo António e Misericórdia, Santa Maria Maior e Arroios, São Vicente e Penha de França, e São Domingos de Benfica e Alvalade.

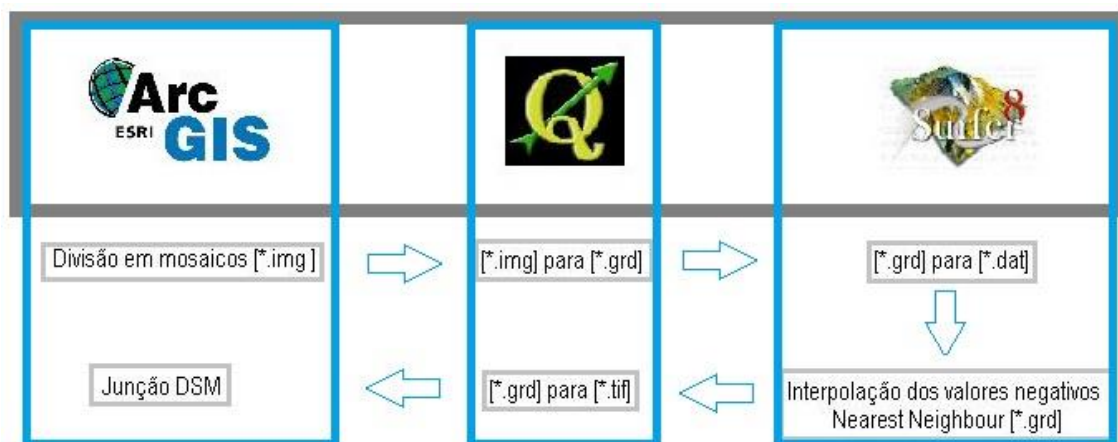


FIGURA 11. PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO DOS VALORES NEGATIVOS

Cada um destes ficheiros *raster* foi submetido ao processo esquematizado na Figura - 11 através do qual se substituíram as células com valores negativos por valores interpolados da vizinhança. Os métodos de interpolação visam a obtenção de valores para as células não preenchidas [Matos, 2008]. No caso a tratar, optou-se pela utilização do método *Nearest Neighbour*, que atribui às células com valor negativo, o valor médio das células que lhe são vizinhas.

Obeve-se assim um MDS LiDAR corrigido dos valores negativos, com valores altimétricos entre os 0.01 m e os 177.56 m. (Figura - 12).

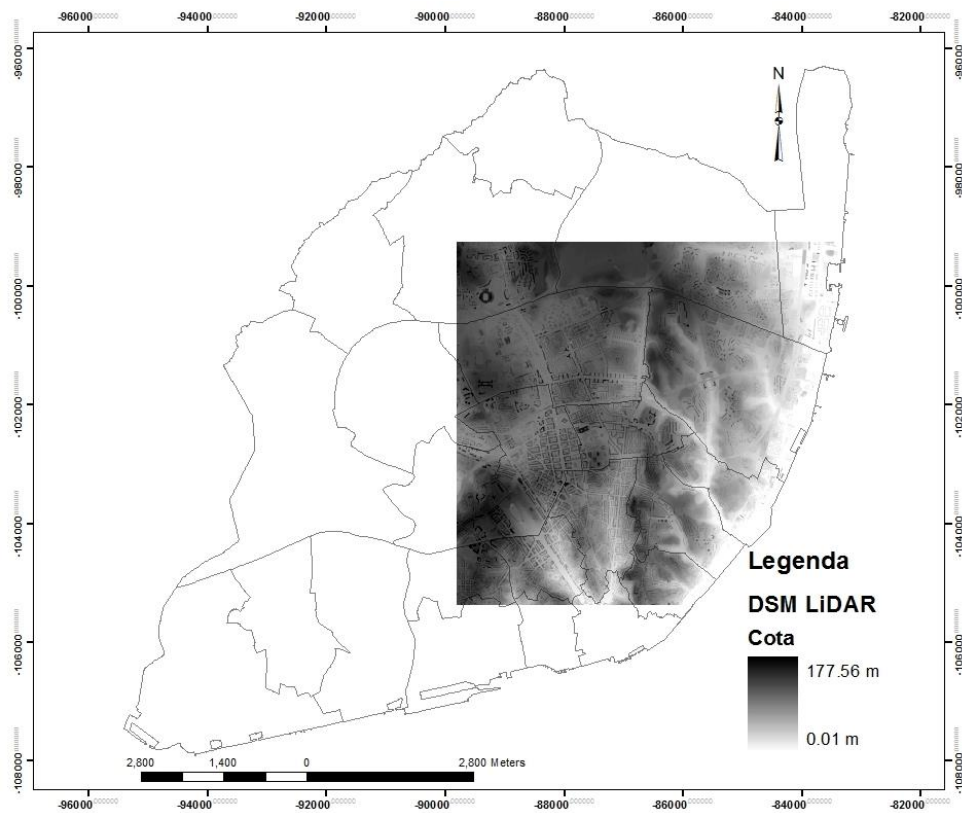


FIGURA 12. MDS LiDAR CORRIGIDO

### 4.3.2 Determinação das linhas de acumulação de água

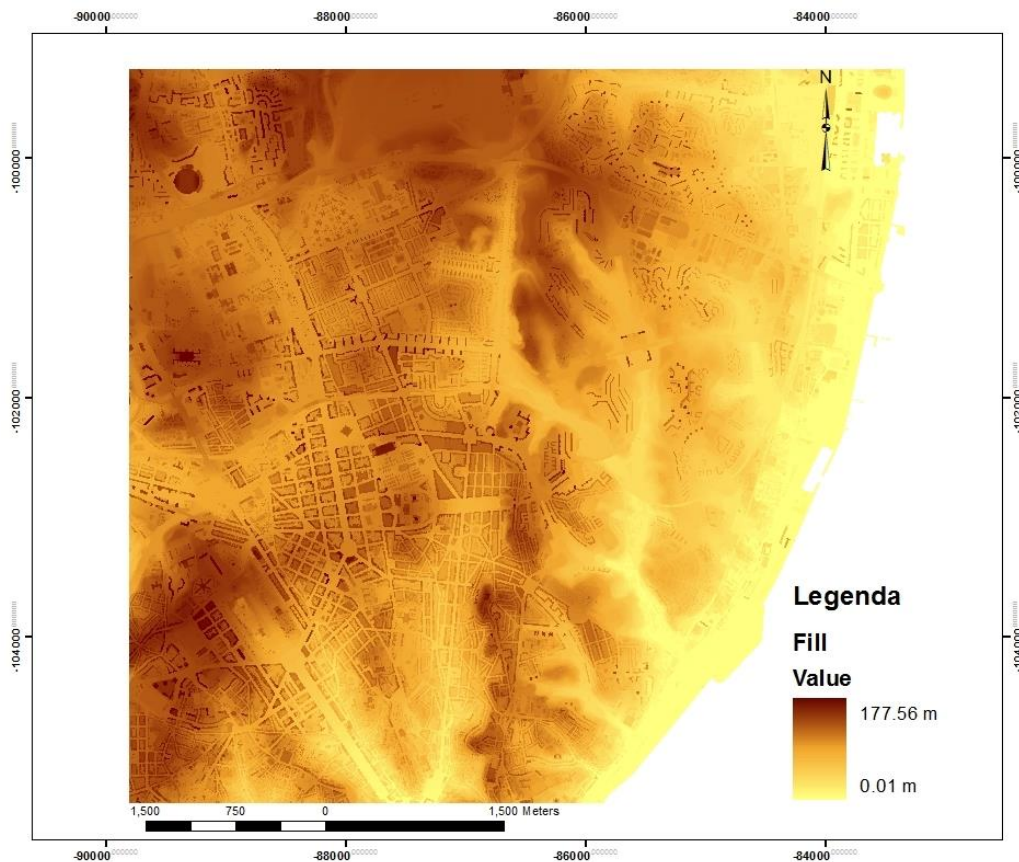
Para testar a possibilidade de utilizar uma superfície produzida a partir dos dados LiDAR na determinação das linhas de acumulação de água, foi aplicado sobre esta superfície o processo hidrológico (Figura - 13) disponibilizado na ferramenta *Hydrology Tools* do software ArcGIS.



FIGURA 13. PROCESSO HIDROLÓGICO DO ARCGIS



### Eliminação das depressões



**FIGURA 14. MDS LIDAR SEM DEPRESSÕES**

A primeira fase deste processo consistiu na eliminação das depressões existentes no MDS Lidar, para evitar o aparecimento de pontos de acumulação nessas zonas, o que na prática não deve existir. Essas depressões são identificadas pela direção de escoamento e ocorrem em locais onde todas as células à sua volta, considerando uma conectividade-8, apresentam uma elevação superior, ou quando duas células escorrem uma para a outra, o que leva a que o sentido de direção do escoamento seja interrompido. Esta correção foi realizada aplicando uma operação responsável pelo preenchimento dessas depressões, que atribui à depressão o valor de elevação da célula vizinha que apresenta a menor elevação. Assim sendo, obteve-se uma superfície (Figura - 14) que permite um escoamento correto da água na rede hidrográfica.

### Direções de escoamento

A etapa seguinte consistiu na determinação automática das direções de escoamento do fluxo de água. Neste processo, cada gota de água que atinge uma qualquer célula, vai procurar na sua vizinhança de 8 células, a que tem o valor mais baixo de altitude, escoando para essa, e

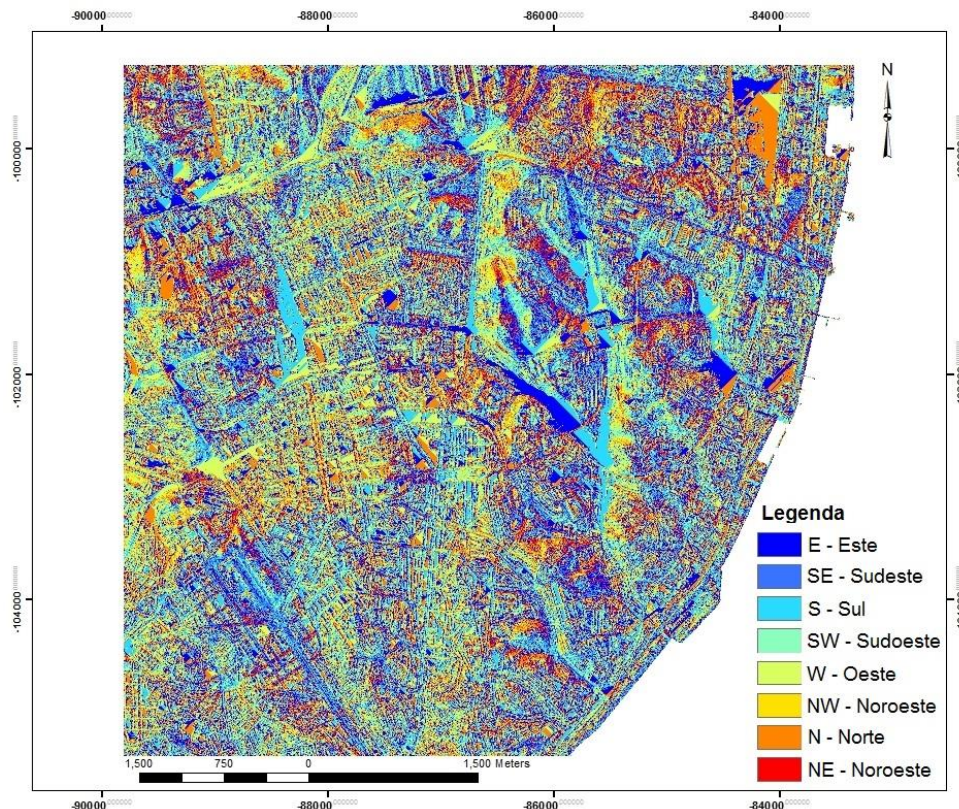


assim sucessivamente, traçando o percurso a seguir. A operação realizada é responsável por codificar cada célula com um valor que representa a direção para a qual a célula escoar, de acordo com as direções dos pontos cardeais (Figura - 15).

NW 32	N 64	NE 128
W 16	Célula central	E 1
SW 8	S 4	SE 2

**FIGURA 15. DIREÇÕES CONSIDERADAS  
NO ESCOAMENTO**

Deste modo, obtém-se como resultado a superfície classificada quanto às direções de escoamento (Figura - 16), em que cada elemento da legenda diz respeito a uma direção.

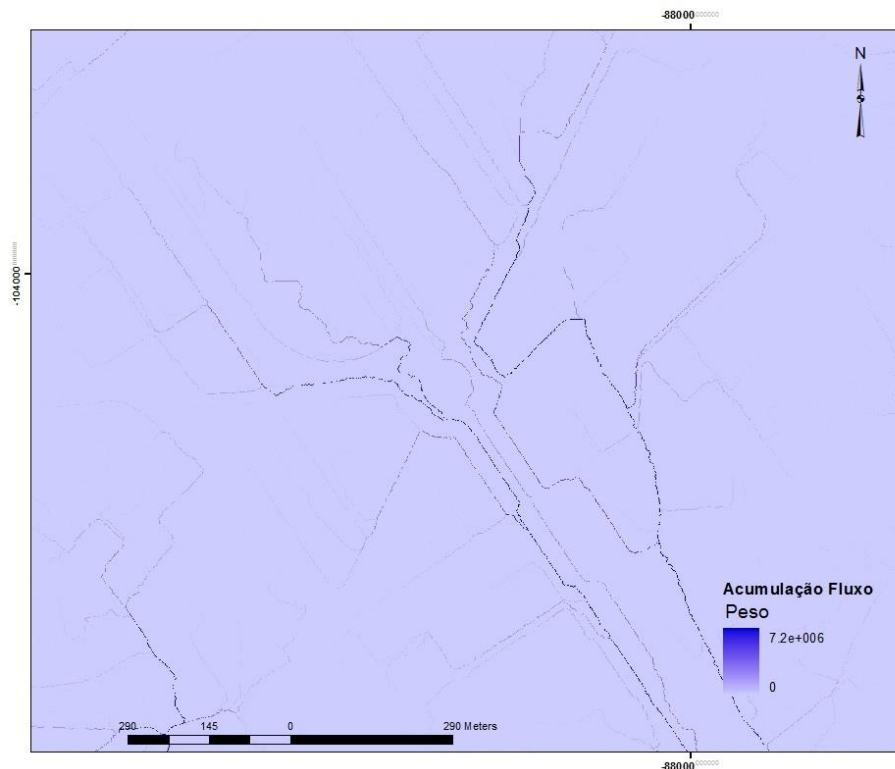


**FIGURA 16. DIREÇÕES DE ESCOAMENTO DO MDS LIDAR**

### Acumulação do escoamento

Determinou-se depois a acumulação do escoamento, para identificar o somatório de todas as células que apresentam maior valor de gradiente, o que permite simular as principais linhas de água. Nesta operação, cada célula apresenta um determinado peso que pode contribuir para a acumulação do escoamento. Se uma célula não apresentar direção de escoamento, esta não vai poder contribuir para a acumulação.

A delimitação da rede hidrográfica é então possível de ser feita através da extração das células de máximo escoamento. As zonas onde a acumulação tem um peso nulo correspondem a zonas onde não se verifica qualquer tipo de acumulação, tratando-se das zonas altas (Figura - 17).



**FIGURA 17. ACUMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NO MDS LIDAR**

### Linhas de acumulação de água

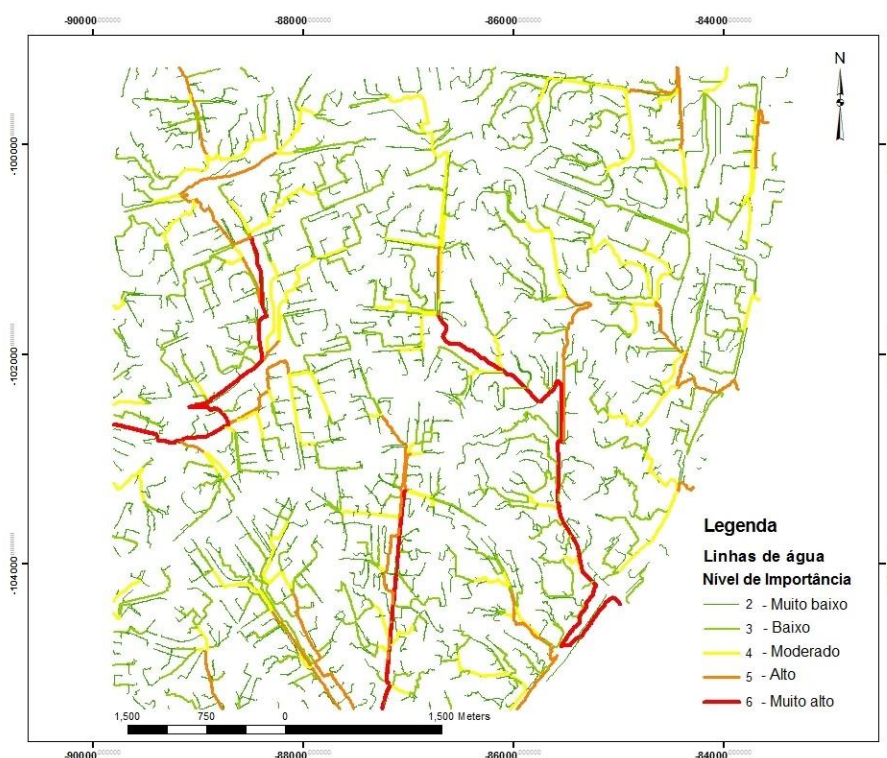
De seguida, definiu-se o traçado que representa a rede hidrográfica. Esta operação é realizada automaticamente, sendo previamente necessário definir um valor constante que vai representar o valor mínimo das células a ser extraído para a rede hidrográfica. No entanto é necessário ter em atenção que se for atribuído um valor muito baixo, a rede hidrográfica resultante vai ser demasiado detalhada, e se o valor for muito alto, a rede será muito

simplificada, apresentando apenas as linhas de água principais. Neste caso utilizou-se o valor 2000, onde se obteve as linhas de água da cidade, perfazendo um total de 6 classes de importância e, descartando a classe 1 por corresponderem a troços sem tributários de nível superior, não apresentando significado potencial em risco de inundação.

O processo iniciou-se pela realização da operação em que todos os valores que satisfazem a condição imposta pela seleção de todos os valores superiores a 2000 vão ser reclassificados com o valor 1, permitindo assim identificar todas as células que vão integrar a rede hidrográfica.

Seguiu-se a hierarquização de todas as linhas de água que integram a rede hidrográfica com base no critério do número de ramais tributários. Dessa operação resultou então um total de 6 classes hierárquicas, sendo a classe 6 a que apresenta uma maior importância e a classe 1 a que pode ser descartada por não ter significado potencial para o risco de inundação.

De seguida, e por último, o ficheiro resultante desta operação foi convertido numa *shapefile* de linhas, eliminaram-se os segmentos classificados com o valor 1, e alterou-se a representação dos segmentos restantes, por forma a permitir uma visualização inteligível da rede hidrográfica (Figura – 18).



**FIGURA 18. LINHAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA DE ACORDO COM O NÍVEL DE IMPORTÂNCIA**



### 4.3.3 Avaliação do comportamento do algoritmo de detecção de linhas de água sobre o MDS LiDAR

Para verificar o comportamento do algoritmo utilizado sobre o MDS LiDAR para determinar as linhas de acumulação de água, cruzou-se a informação obtida das linhas de acumulação de água com o próprio MDS. Foi possível visualizar que as linhas de água delineadas vão contornar o edificado (Figura - 19). Desta forma pode-se afirmar que a utilização de um MDS LiDAR para determinar as linhas de acumulação de água é funcional, podendo assim considerá-lo para a determinação das zonas de maior probabilidade de inundação, sendo este mais viável que um MDT uma vez que representa uma maior aproximação da superfície urbana real.



FIGURA 19. LINHAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA SOBRE O EDIFICADO DO LiDAR

## 4.4 Modelo de Superfície

Verificou-se até então que um MDS LiDAR pode ser usado como informação de entrada para o processo hidrológico existente no ArcGIS e produzir desta forma uma cartografia com as linhas de maior acumulação de água de um ambiente urbano. No entanto a zona coberta pelos dados LiDAR corresponde apenas a uma parte da cidade em estudo. Como tal, foi necessário

determinar uma metodologia (Figura – 20) que permitisse criar uma superfície semelhante a um MDS, passível de ser utilizado, para sobre ele se testar a determinação das linhas de acumulação de água para toda a cidade de Lisboa.

Assim, para criar uma superfície idêntica a um MDS, através da utilização dos dados existentes no servidor da CML e com o intuito de permitir a modelação do escoamento superficial das águas pluviais, foi necessário proceder à junção de informação pontual proveniente do Modelo Numérico Altimétrico (MNA) e à informação relativa ao número de pisos do edificado existente no concelho de Lisboa, de modo a obter uma superfície representativa da superfície terrestre, acrescida da elevação do edificado da cidade.

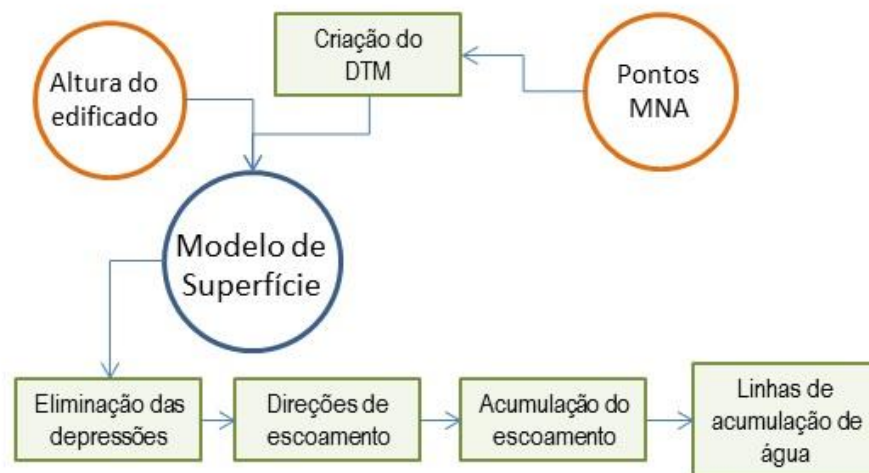


FIGURA 20. METODOLOGIA UTILIZADA NA CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SUPERFÍCIE

#### 4.4.1 Criação do MDT

Para a criação do MDT do concelho de Lisboa foram usados os ficheiros do MNA existentes em estruturas de dados do tipo *Computer Aided Design* (CAD), a partir dos quais foi extraída a informação pontual relativa às cotas do terreno, usando para o efeito o *software* ArcGIS. Este conjunto de dados utilizados foi gerado a partir de um voo fotogramétrico realizado em julho de 2011, com apoio fotogramétrico em setembro do mesmo ano e disponibilizado ao SMPC em maio de 2013. Não se tratam de dados finais uma vez que o processo de aquisição ainda não está concluído porque os dados ainda não foram certificados. Contudo, verificou-se que não existiam erros significativos tais como zonas sem pontos com cota atribuída ou pontos com cotas muito discrepantes relativamente ao que seria suposto, e também por ser a informação mais recente disponibilizada ao SMPC, tomou-se a decisão de os utilizar.

Após reunir todas as *shapefiles* de pontos do MNA, estas foram unidas num só ficheiro e posteriormente atribuiu-se-lhe o sistema de coordenadas *Datum 73 – Hayford Gauss IPCC*. Utilizou-se este como sistema de referência e não o Datum PT-TM06/ETRS89 porque os dados existentes no servidor da CML ainda se encontram todos no sistema anterior e foi requerido pela Proteção Civil que assim fosse. Contudo é de extrema importância e será um assunto a tratar em breve, a passagem de toda a informação geográfica para o sistema PT-TM06/ETRS89 uma vez que é este o sistema oficial atual.

A informação pontual existente nesse ficheiro excedia o limite do concelho de Lisboa. Foi necessário utilizar uma *shapefile* dos limites administrativos do concelho de Lisboa referente ao ano de 2013, a mais atualizada à data da realização do trabalho, para excluir a informação não necessária.

Com as reformas administrativas que foram definidas em 2013, o concelho de Lisboa sofreu alterações nos seus limites administrativos das freguesias, passando a fazer parte dele também uma porção de terreno que anteriormente pertencia ao concelho de Loures. Como a informação do MNA não estava ainda atualizada, foi necessário tratar à parte a informação referente a essa área. Utilizou-se uma *shapefile* do MNA de Loures com as cotas da zona necessária, cedida pela Câmara Municipal de Loures e sem conhecimento sobre a sua forma de aquisição, da qual se selecionaram apenas os pontos delimitados pelos limites administrativos do concelho de Lisboa. Assim, obtiveram-se 2 ficheiros com a informação das cotas para todo o concelho de Lisboa. Esses 2 ficheiros foram unidos num só, gerando-se assim um único ficheiro com toda a informação pontual necessária, perfazendo um total de 189 880 pontos cotados.

A partir desse ficheiro criou-se uma superfície TIN, através da qual se gerou posteriormente o *raster* correspondente ao MDT com uma resolução espacial de 1 m (Figura – 21). O *software* não permitiu criar diretamente um MDT com a resolução de 1 m a partir do TIN, portanto criou-se primeiramente um MDT com resolução espacial de 5 m que foi depois reamostrado para uma resolução espacial de 1 m.

O *raster* gerado pelo TIN contém informação fora dos limites administrativos de Lisboa, sendo necessário efetuar um recorte da grelha *raster* pelos limites administrativos de Lisboa. Desta forma, obtém-se o *raster* apresentado na Figura – 22, que corresponde ao MDT gerado para o concelho de Lisboa, com valores altimétricos entre 0.06 m e 214.5 m.

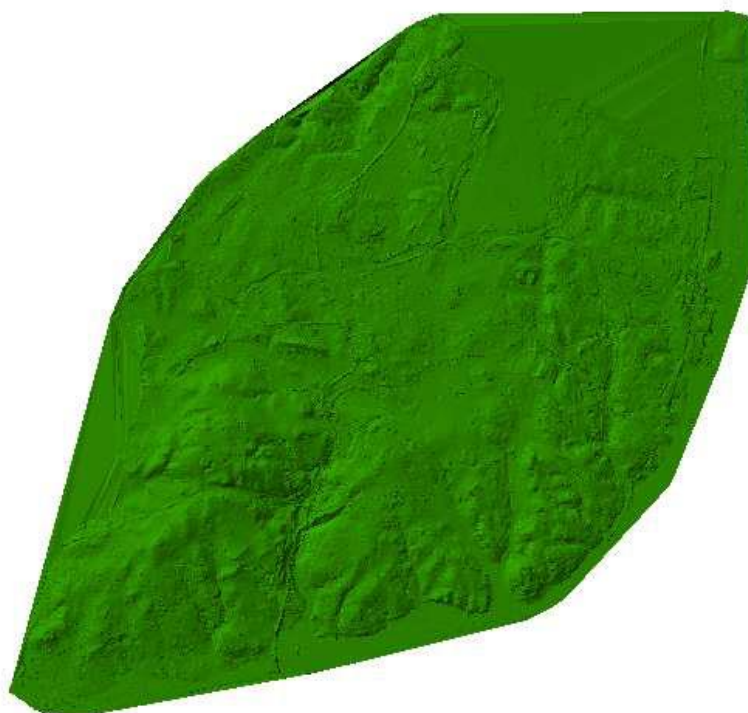


FIGURA 21. TIN CRIADO COM OS PONTOS DO MNA

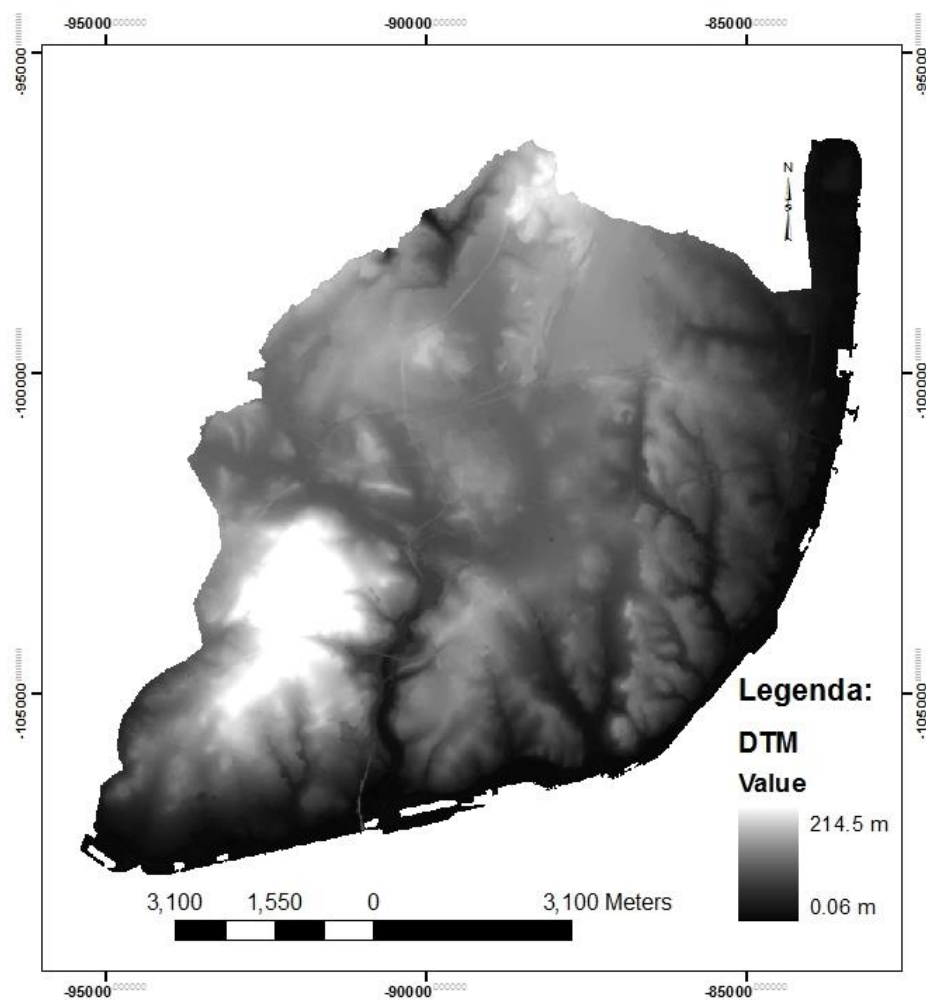


FIGURA 22. MDT CRIADO PARA O CONCELHO DE LISBOA

#### 4.4.2 Atribuição de elevação aos edifícios

Após o tratamento da informação relativa ao terreno que resultou num MDT para o concelho de Lisboa, foi necessário efetuar o tratamento dos dados relativos ao edificado para juntar ao MDT, formando assim o modelo da superfície pretendido.

Uma vez que não existe informação quanto à elevação dos edifícios da cidade de Lisboa, considerou-se que a opção mais viável a seguir seria utilizar o número de pisos de cada edifício para calcular uma altura aproximada de cada um, considerando que cada piso tem em média 3 m de altura. Se o objetivo do trabalho consistisse na criação de um MDS, então este processo seria incorreto porque iria introduzir erros ao estimar a altura dos edifícios, mas como se pretende criar uma superfície que vai ser utilizada para calcular o escoamento superficial das águas pluviais, então este método é aceitável porque não é necessário saber a altura exata do edificado, o algoritmo apenas precisa de distinguir as células com maior elevação das que têm menor elevação porque a água escoa das células mais elevadas para as células menos elevadas. O essencial é que as linhas de água calculadas para a cidade respeitem a construção dos edifícios, não atravessando os locais onde estes existem.

Para tal, utilizou-se informação do edificado, existente no servidor de dados da CML. Nesta *shapefile*, existe um campo denominado por IDTIPO que classifica os polígonos dos edifícios quanto ao seu tipo: edifícios subterrâneos, edifícios sem elevação e edifícios com elevação. Para o estudo em causa apenas se utilizaram os edifícios com elevação.

Para além desta filtragem aplicada aos dados de base, foram ainda filtrados todos os edifícios com área inferior a 15.00 m<sup>2</sup> por se considerarem edifícios pontuais como quiosques e portarias de parques de estacionamento. Excluiu-se também um conjunto de edifícios que ficava fora dos limites administrativos do concelho.

Verificou-se a existência da repetição do código\_SIG, em alguns casos, um atributo da *shapefile* que visa identificar os edifícios, o que aconteceu devido à distinção entre área principal e área secundária dos edifícios. Para evitar essa repetição, foi efetuada uma operação para juntar as áreas secundárias com as primárias, ficando com um código SIG para cada edifício.

Obteve-se desta forma uma *shapefile* com um total de 54 985 edifícios, dos quais 42 664 se encontravam classificados quanto ao número de pisos e 12 321 por classificar.

Para se conseguir realizar a classificação de uma forma mais organizada, os edifícios foram divididos consoante as freguesias, como consta na Tabela – 4, e a classificação do número de pisos dos edifícios foi então feita tendo em conta os seguintes critérios:

- Edifícios isolados – classificados através de visualização na vista 3D do *Google Earth*;



- Estádio, Pavilhões, Monumentos e outras estruturas consideradas pertinentes – atribuiu-se um número de pisos incorreto porque os pisos têm uma elevação maior que 3 m, como por exemplo os estádios do Sporting e do Benfica e o Pavilhão Atlântico;
- Os restantes edifícios foram classificados de acordo com a classificação já atribuída aos edifícios vizinhos.

**TABELA 4. NÚMERO DE EDIFÍCIOS CLASSIFICADOS E POR CLASSIFICAR QUANTO AO NÚMERO DE PISOS**

<b>Freguesia</b>	<b>Total de Edifícios</b>	<b>Classificados</b>	<b>Por Classificar</b>
Ajuda	2598	2172	426
Alcântara	1770	1640	130
Alvalade	2940	1566	1374
Areeiro	1476	1130	346
Arroios	3536	2355	1181
Avenidas Novas	2167	2075	92
Beato	1706	463	1243
Belém	3169	2401	768
Benfica	3003	2906	97
Campolide	2234	1948	286
Campo de Ourique	2402	2367	35
Carnide	1790	1338	452
Estrela	3013	2955	58
Lumiar	2062	1855	207
Marvila	1790	1439	351
Misericórdia	2532	2135	397
Olivais	2973	2136	837
Parque das Nações	765	315	450
Penha de França	2469	864	1605
S. D. Benfica	1863	1079	784
São Vicente	2088	1917	171
Santo António	2054	1967	87
Santa Maria Maior	2095	2860	45
Santa Clara	1674	776	898

Tendo todos os edifícios de todas as freguesias classificados quanto ao número de pisos, voltou-se a juntar a informação numa só *shapefile*. De seguida, e por último neste processo, foi criado o campo Elevacao, correspondente à elevação de cada edifício, em metros,

que foi classificado através da multiplicação do campo do número de pisos pelo valor 3, altura aproximada de cada piso. Conseguiu-se assim obter uma *shapefile* com a classificação de todos os edifícios do concelho de Lisboa quanto à sua elevação (Figura - 23), com alturas entre os 3 m e os 78 m e uma altura média de cerca de 10 m.

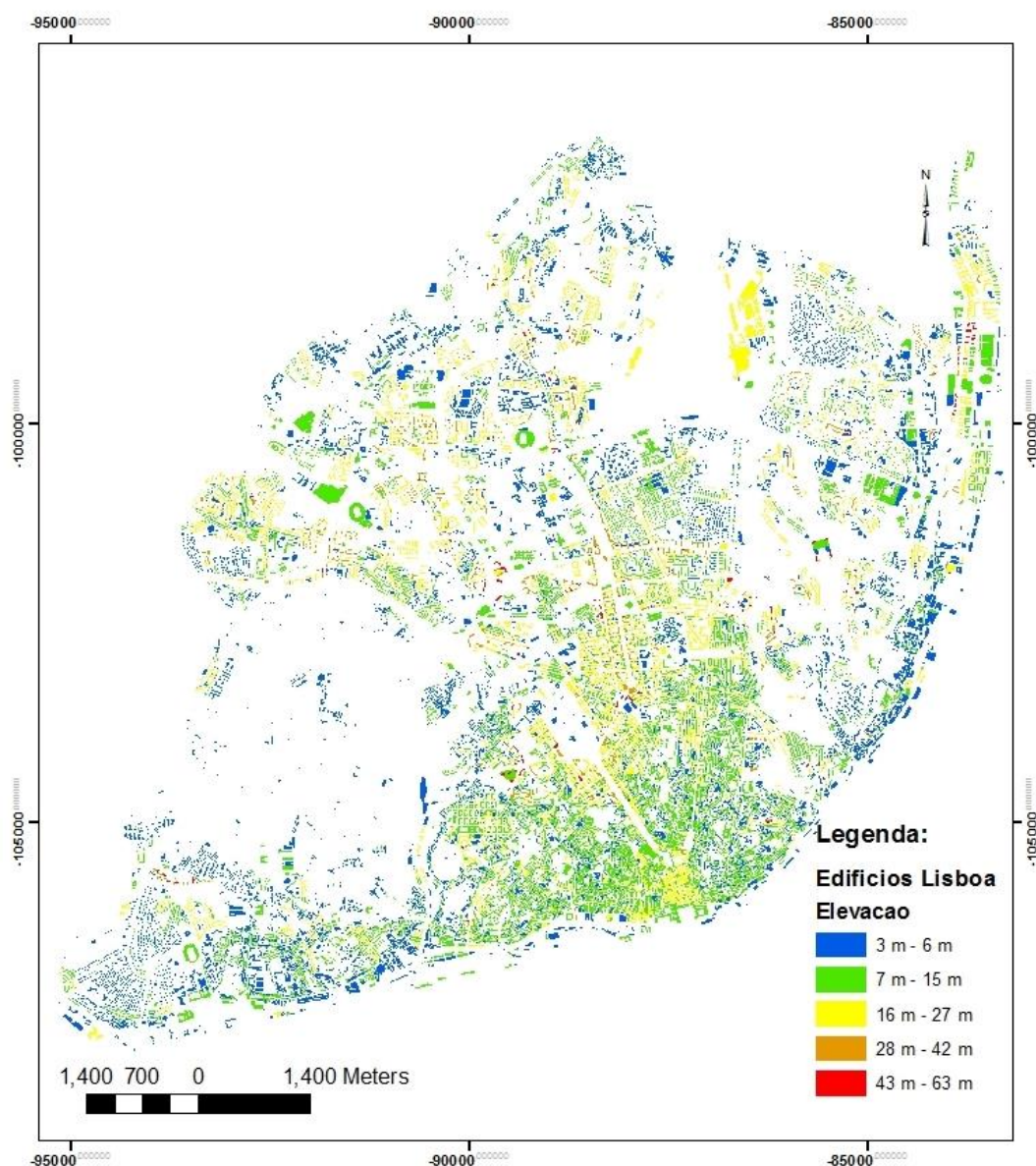


FIGURA 23. CLASSIFICAÇÃO DOS EDIFÍCIOS QUANTO À ELEVACÃO

#### 4.4.3 Criação do Modelo de Superfície

A criação do Modelo de Superfície tornou-se um processo bastante moroso uma vez que o volume de dados em causa era muito elevado requerendo a realização de subdivisões nos ficheiros até se obterem ficheiros com dimensões passíveis de serem processadas pelo computador disponível para o projeto.

Foi necessário dividir o MDT da cidade em duas partes: este e oeste, para conseguir converter o *raster* para uma *shapefile* de pontos regulares com resolução de 1 m. Utilizaram-se os limites das freguesias do concelho de Lisboa, ficando na parte este as freguesias de Alvalade, São Vicente, Misericórdia, Santo António, Santa Maria Maior, Parque das Nações, Avenidas Novas, Areeiro, Beato, Arroios, Olivais, Penha de França e Marvila, e na parte oeste as freguesias de Carnide, Belém, São Domingos de Benfica, Santa Clara, Estrela, Ajuda, Campo de Ourique, Benfica, Campolide, Alcântara e Lumiar (Figura – 24).

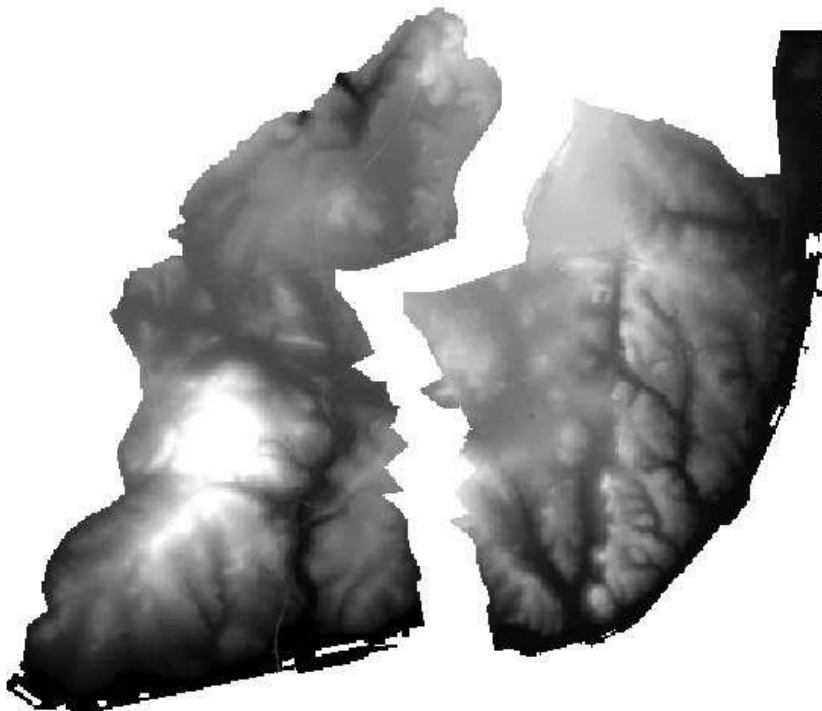


FIGURA 24. DIVISÃO DO MDT DO CONCELHO EM 2 PARTES

Após a conversão dos dois *rasters* em *shapefiles* pontuais, os passos seguintes foram realizados ao nível da freguesia, alguns mais detalhados até, devido à incapacidade do *software* ArcGIS e do computador suportarem o processamento da dimensão de dados (Tabela - 5). As freguesias que foram divididas, foram-no através da utilização dos limites das BGRI de 2011.

**TABELA 5. NÚMERO DE DIVISÕES APLICADAS ÀS FREGUESIAS**

<b>Freguesia</b>	<b>Divisões</b>	<b>Freguesia</b>	<b>Divisões</b>
Ajuda	1	Estrela	1
Alcântara	3	Lumiar	2
Alvalade	2	Marvila	2
Areeiro	1	Misericórdia	1
Arroios	1	Olivais	3
Avenidas Novas	1	Parque das Nações	2
Beato	1	Penha de França	1
Belém	2	S. D. Benfica	2
Benfica	3	São Vicente	1
Campolide	1	Santo António	1
Campo de Ourique	1	Santa Maria Maior	1
Carnide	2	Santa Clara	1

Assim sendo, para cada uma dessas divisões foram criadas *shapefiles* com os respetivos pontos de cada uma das áreas.

**FIGURA 25. PONTOS CORRESPONDENTES AO EDIFICADO**

Realizou-se depois uma interseção dos pontos de cada área com os polígonos do edificado por forma a selecionar todos os pontos que se sobrepõem com o edificado, atribuindo assim a cada ponto, o valor correspondente da elevação do edifício (Figura -25).

Eliminaram-se posteriormente da *shapefile* todos os pontos que se sobrepunham com o edificado, para depois juntar os pontos já classificados com a elevação dos edifícios. Assim obteve-se um ficheiro apenas com os pontos sobrepostos ao terreno. (Figura - 26).



**FIGURA 26. PONTOS CORRESPONDENTES AO TERRENO**

Os pontos sobrepostos com o terreno e os pontos sobrepostos com o edificado foram juntos num único ficheiro, que passou a conter um atributo correspondente à cota do terreno e outro atributo correspondente à altura do edificado. Os pontos sobrepostos com o terreno são classificados com o valor zero no atributo correspondente à altura do edificado.

Para determinar a cota final para cada ponto criou-se um atributo que foi calculado a partir da soma do atributo correspondente à cota do terreno com o atributo correspondente à altura do edificado, obtendo-se assim o valor altimétrico que classifica cada um dos pontos, valor este que posteriormente vai ser utilizado para gerar o modelo de superfície.

No passo seguinte, cada uma destas *shapefiles* de pontos foi convertida num *raster* com resolução de 1 m e de seguida, para criar o modelo de superfície, esses *rasters* foram agrupados num único ficheiro *raster* correspondente a um modelo de superfície para toda a cidade de Lisboa (Figura – 27), com valores altimétricos entre 0.06 m e 216.98 m.



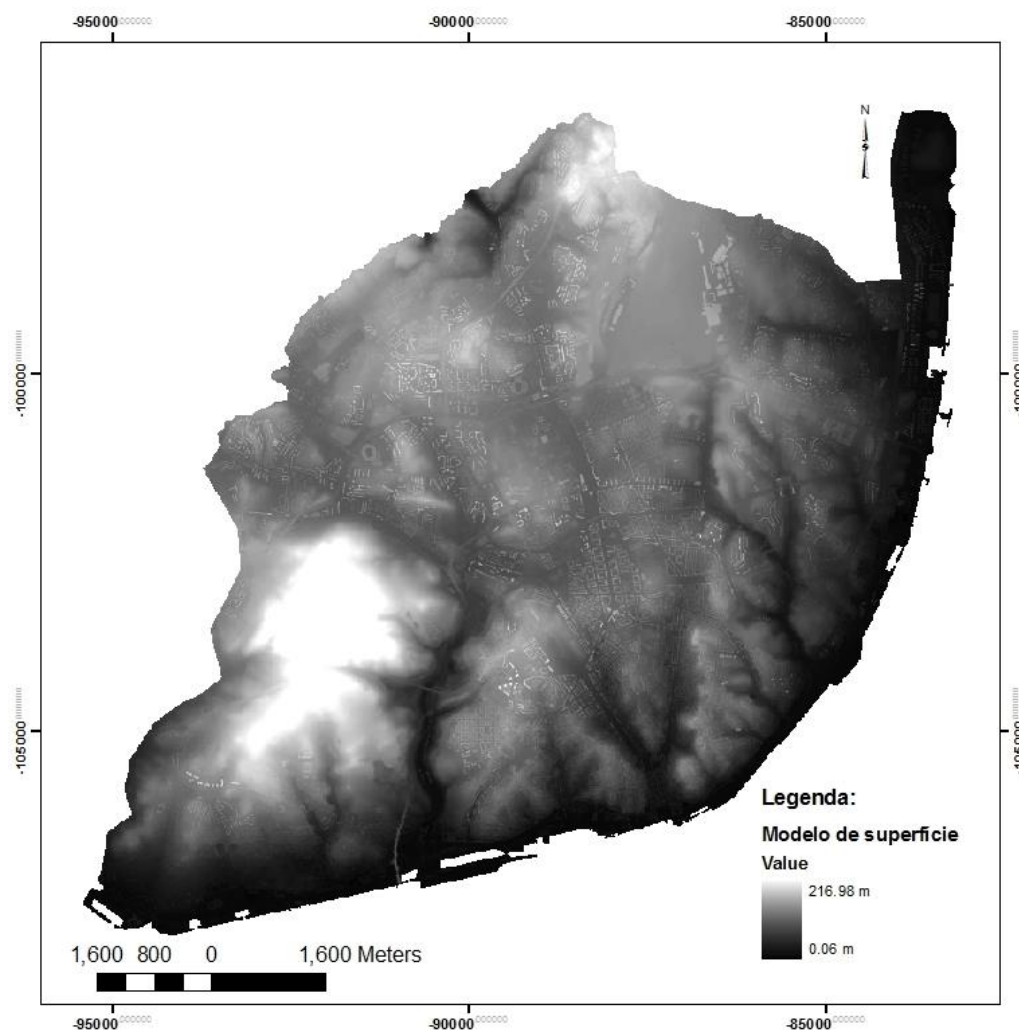


FIGURA 27. MODELO DE SUPERFÍCIE CRIADO

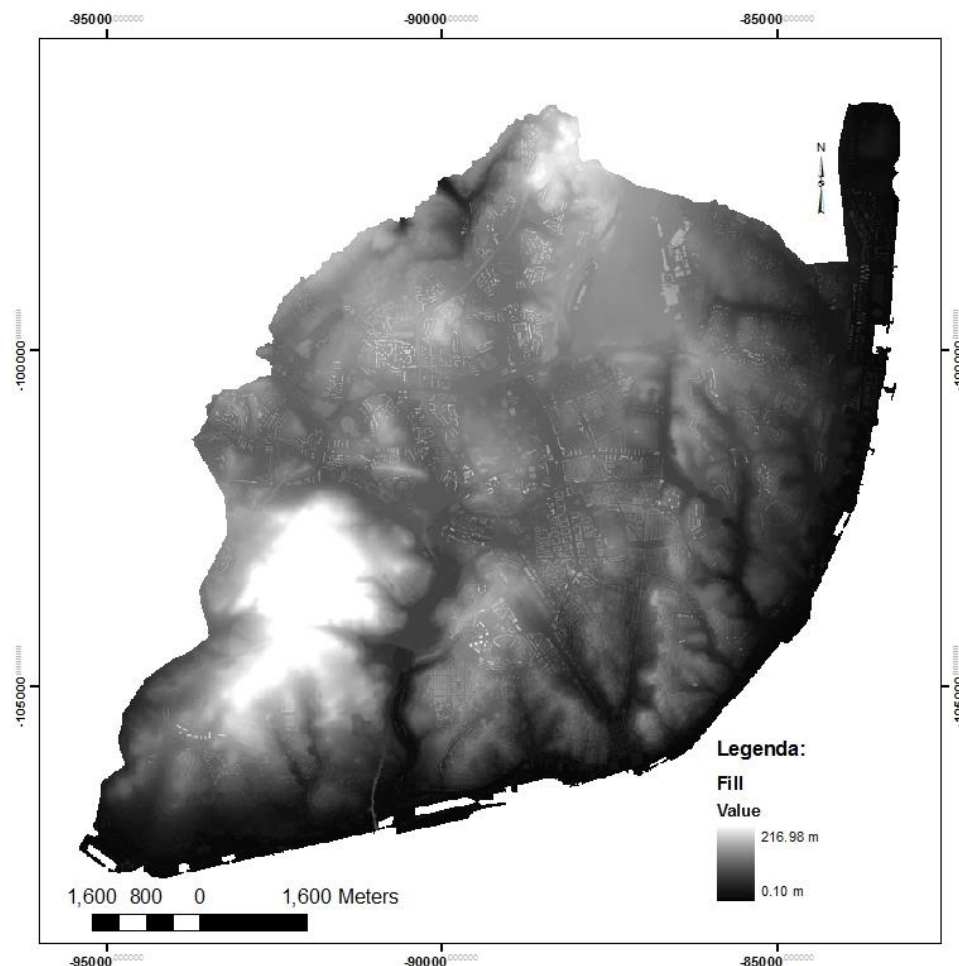
#### 4.4.4 Determinação das linhas de acumulação de água

Estando agora na posse de um modelo de superfície para a totalidade da cidade, este foi usado como objeto de entrada na modelação hidrológica, tal como tinha já sido efetuado anteriormente com o MDS Lidar, de modo a verificar se as linhas de água detetadas coincidem com as que foram detetadas sobre o MDS LiDAR e, desta forma, poder prosseguir com o projeto utilizando esta superfície.

Assim, repetiram-se os procedimentos descritos no subcapítulo 4.2.2, de onde surgiram os resultados apresentados de seguida.

### Eliminação das depressões

Para o processo da eliminação das depressões existentes no modelo de superfície, obteve-se uma superfície (Figura – 28) que permite um escoamento correto da água na rede hidrográfica.



**FIGURA 28. MODELO DE SUPERFÍCIE SEM DEPRESSÕES**

### Direções de escoamento

A determinação das direções de escoamento conduziu ao resultado apresentado na carta de direções de escoamento da cidade de Lisboa (Figura – 29).

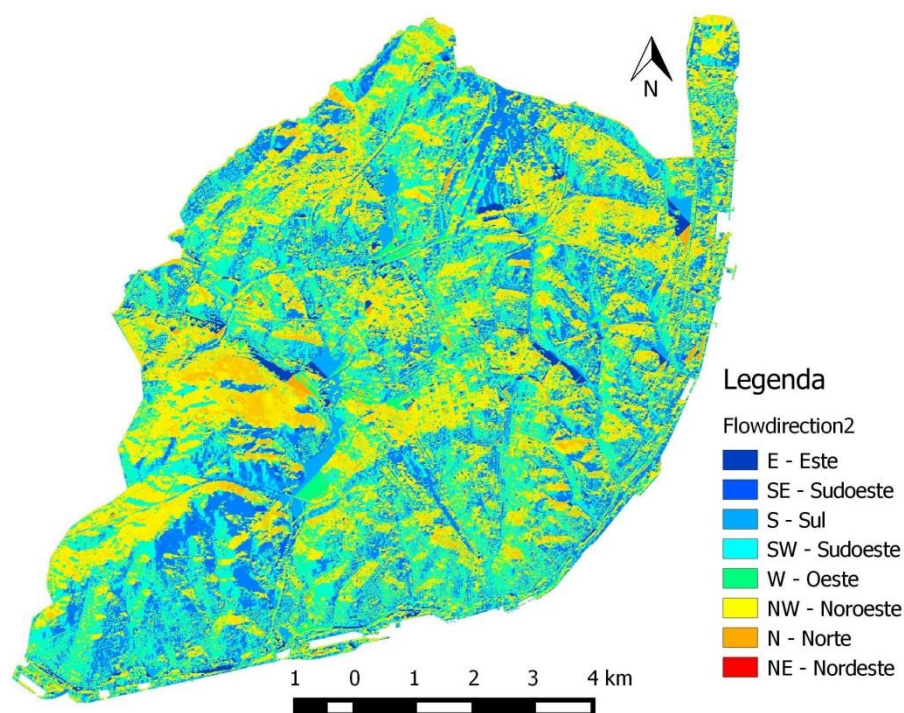


FIGURA 29. DIREÇÕES DE ESCOAMENTO NO MODELO DE SUPERFÍCIE

### Acumulação do escoamento

Da determinação das linhas de acumulação de escoamento superficial, obteve-se a carta de acumulação de escoamento para a cidade de Lisboa (Figura – 30).

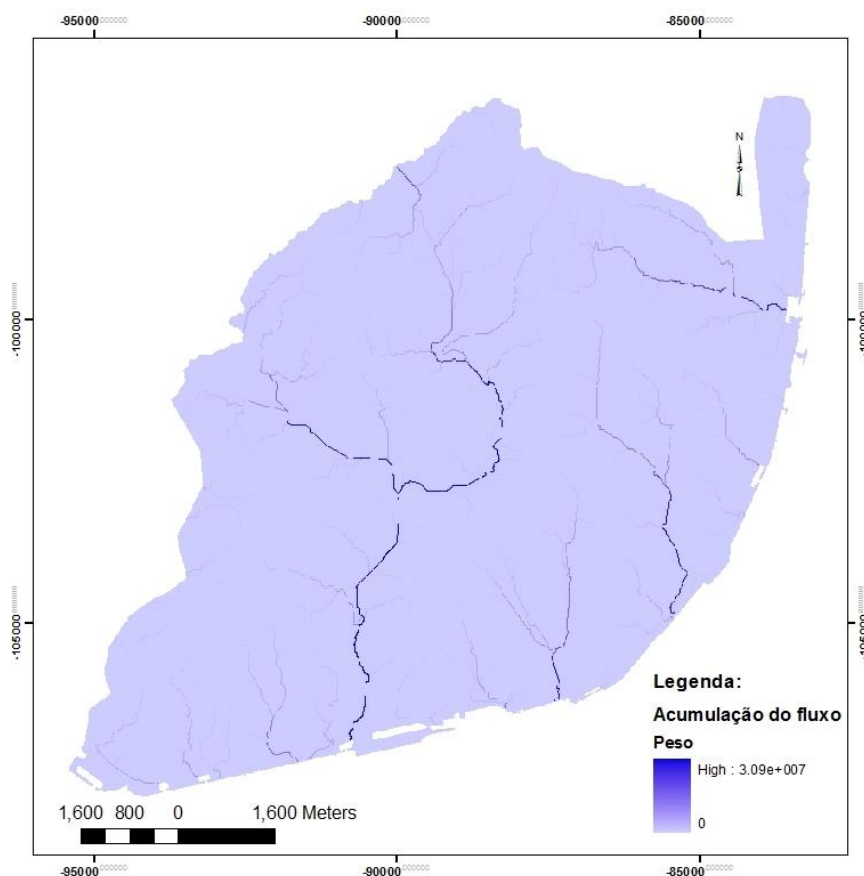
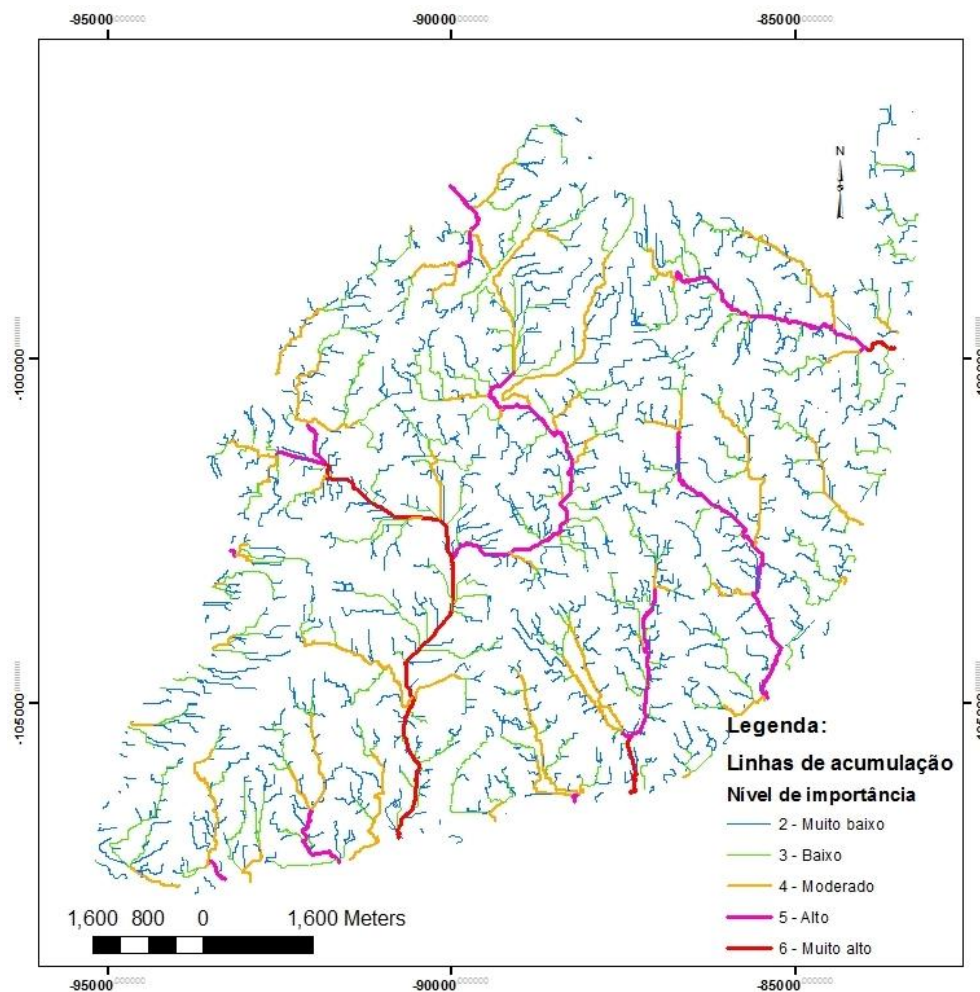


FIGURA 30. ACUMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NO MODELO DE SUPERFÍCIE



### Linhas de acumulação de água

Para a definição do traçado representativo da rede hidrográfica foi necessário definir um valor a partir do qual as células são consideradas células de acumulação, diferente do valor utilizado anteriormente. Nesta situação foram testados vários valores, considerando um determinado intervalo, até se perceber qual o valor mais ajustado, determinando uma rede hidrográfica nem demasiado detalhada, nem demasiado simplificada. Assim, começou-se por testar o valor 1500, que levou à obtenção de uma rede demasiado detalhada e aumentou-se o valor de 500 em 500 unidades. De entre os testes que foram feitos considerou-se que o valor 5000 seria o mais indicado, o que levou à obtenção das linhas de acumulação de água consideradas necessárias e corretas (Figura – 31), tendo em conta estudos anteriores realizados no GAR do SMPC.



**FIGURA 31. LINHAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA DE ACORDO COM O NÍVEL DE IMPORTÂNCIA**

#### 4.4.5 Avaliação do comportamento do algoritmo de detecção de linhas de água sobre o modelo de superfície

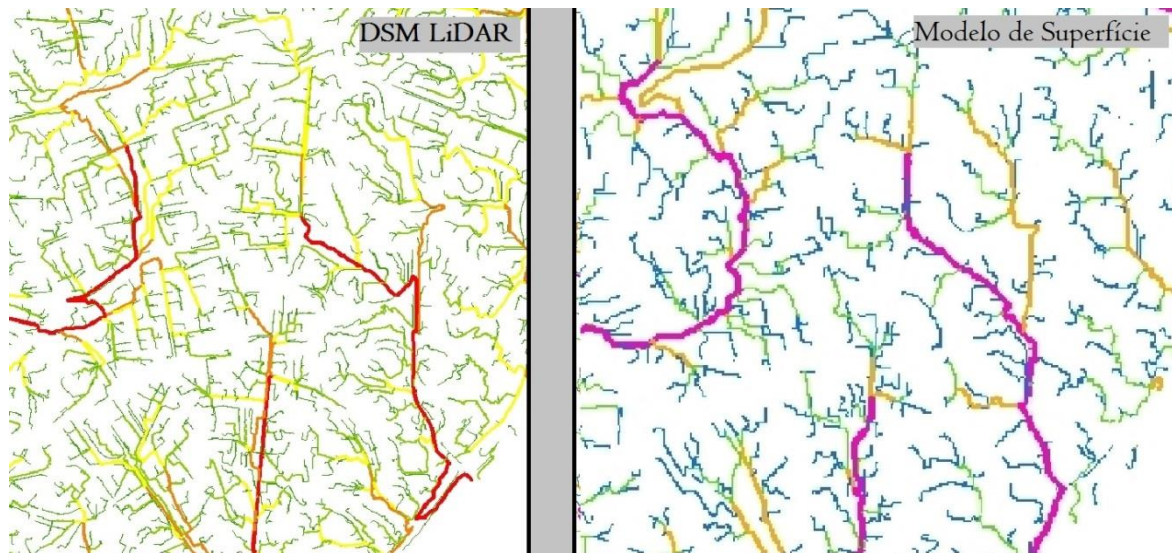
Para averiguar se esta etapa do projeto foi bem sucedida, os resultados obtidos foram cruzados com a informação relativa ao edificado (Figura – 32), para verificar se as linhas de água contornam o edificado, alterando assim o seu curso relativamente às linhas de água determinadas sobre um MDT. Foi então possível confirmar que o modelo de superfície criado pode ser utilizado para determinar as linhas de acumulação de água verificando-se que o edificado tem influência na rede hidrográfica da cidade. Conclui-se assim que mesmo não sendo o Modelo de Superfície o modelo ideal para representar a superfície de uma determinada área, pois não tem em conta os declives e orientações dos telhados, este fornece de qualquer forma resultados mais reais na determinação de linhas de acumulação de água que um MDT, pois constata-se que o edificado altera a direção das linhas de acumulação.



FIGURA 32. CRUZAMENTO DAS LINHAS DE ÁGUA COM O EDIFICADO

Para verificar se o modelo de superfície aqui construído podia ser utilizado como substituição ao MDS LiDAR para determinar as linhas de acumulação de água para toda a cidade e posteriormente para criar o modelo hidrológico, realizou-se uma análise por confrontação de resultados, comparando visualmente as linhas de acumulação de água criadas sobre cada uma das superfícies (Figura – 33). Este tipo de análise permite obter indicações sobre a adequação do modelo a um dado fim, e pode ser utilizada numa grande diversidade de

casos, onde se inclui a comparação de resultados de modelos hidrológicos e a determinação de linhas de água [Matos,2008]. Assim, para a zona coberta pelos dados LiDAR verificou-se que as linhas de acumulação de água determinadas eram as mesmas, apenas com algumas diferenças não muito significativas impostas por objetos que não existem no modelo de superfície e que fazem parte do MDS LiDAR.



**FIGURA 33. LINHAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA SOBRE O MDS LiDAR E SOBRE O MODELO DE SUPERFÍCIE**

Desta forma considerou-se que a utilização do modelo de superfície em substituição do MDS LiDAR seria viável neste projeto.

## **4.5 Comparação entre o modelo de superfície gerado e o MDS LiDAR**

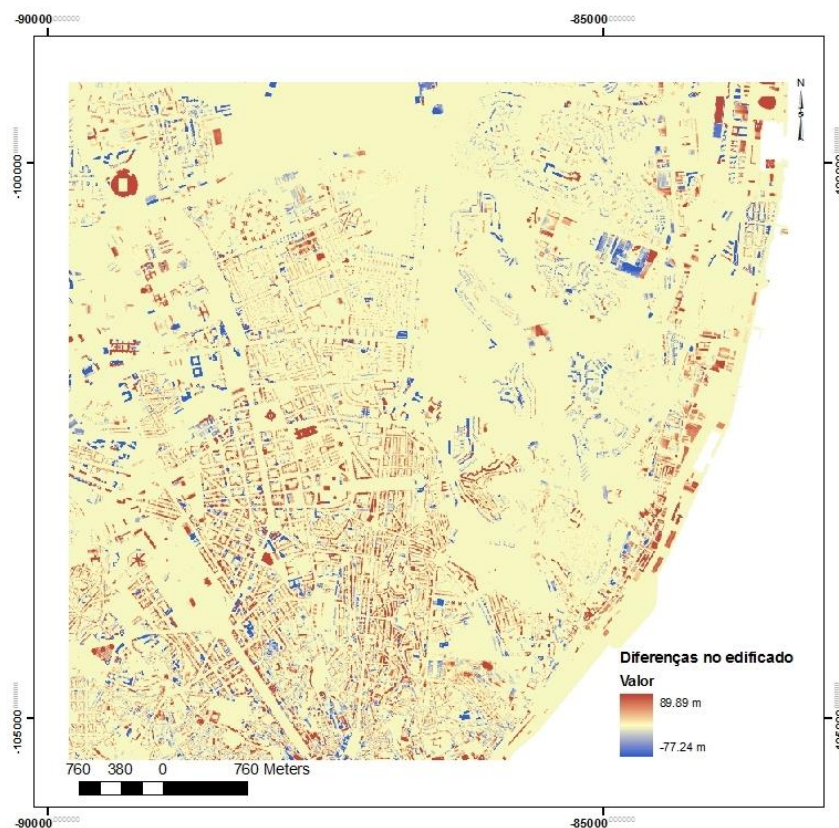
Para perceber de uma forma mais detalhada as diferenças existentes entre o MDS LiDAR e o modelo de superfície que foi construído, procedeu-se a uma análise por confrontação direta de altitudes efetuada entre as duas superfícies, para a zona coberta pelos dados LiDAR. Este tipo de análise pode ser feita recorrendo à subtração entre matrizes de cotas de zonas correspondentes ou entre as altitudes de referência para um conjunto de pontos e a altitude obtida a partir do modelo, permitindo a determinação da discrepância média na altitude, a média do valor absoluto das discrepâncias, o desvio padrão, a discrepância máxima e a discrepância mínima [Matos, 2008]. Certificou-se que as duas superfícies se encontravam no mesmo sistema de coordenadas, PT-TM06/ETRS89, tomou-se o MDS LiDAR como superfície de base e fizeram-se duas comparações diferentes. Uma relativamente ao edificado, e outra relativa apenas ao



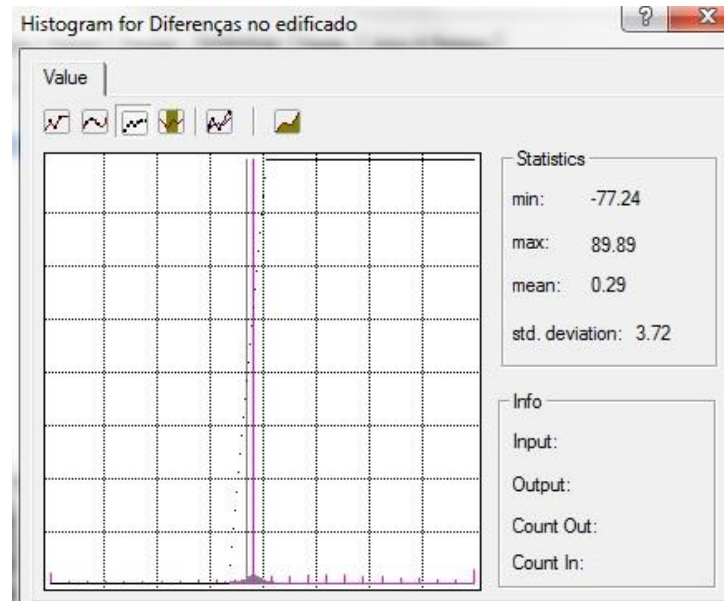
terreno. Para qualquer uma delas, foi necessário converter a informação *raster* dividida por freguesias, em pontos, com resolução de 1 m. Para a análise das diferenças no edificado, todos os pontos sobrepostos com o terreno foram classificados com o valor zero e voltou a juntar-se com a informação classificada dos edifícios e a converter em superfície *raster*. Para a análise das diferenças no terreno, os pontos sobrepostos com o edificado foram classificados com o valor zero, voltou a juntar-se com a informação classificada do terreno e converteu-se em superfície *raster*.

#### 4.5.1 Diferenças no edificado

Sabendo à partida que as cotas do edificado consideradas para a criação do modelo de superfície não são as cotas reais, resolveu-se realizar a diferença do edificado entre as duas superfícies para perceber quais foram os erros cometidos nesse aspeto. O resultado obtido (Figura – 34) expressa diferenças entre os -77.24 m e os 89.89 m, sendo estes valores *outliers*, como se pode verificar no histograma (Figura – 35), um valor médio de 0.29 m e um desvio padrão de 3.72 m.

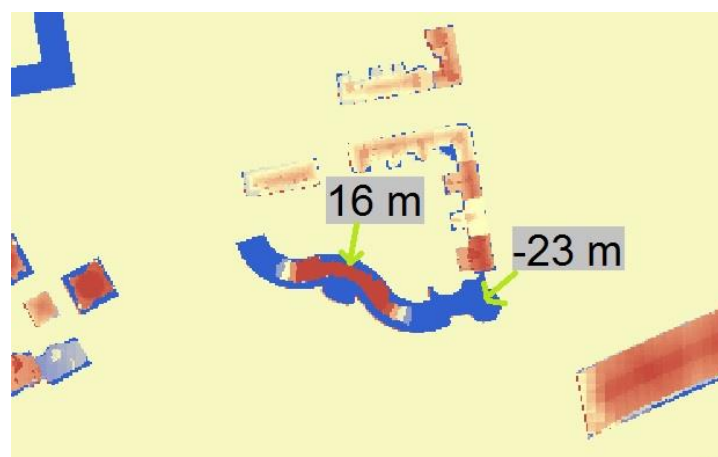


**FIGURA 34. DIFERENÇAS NO EDIFICADO ENTRE O MODELO DE SUPERFÍCIE E O MDS LiDAR**



**FIGURA 35. HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS NO EDIFICADO**

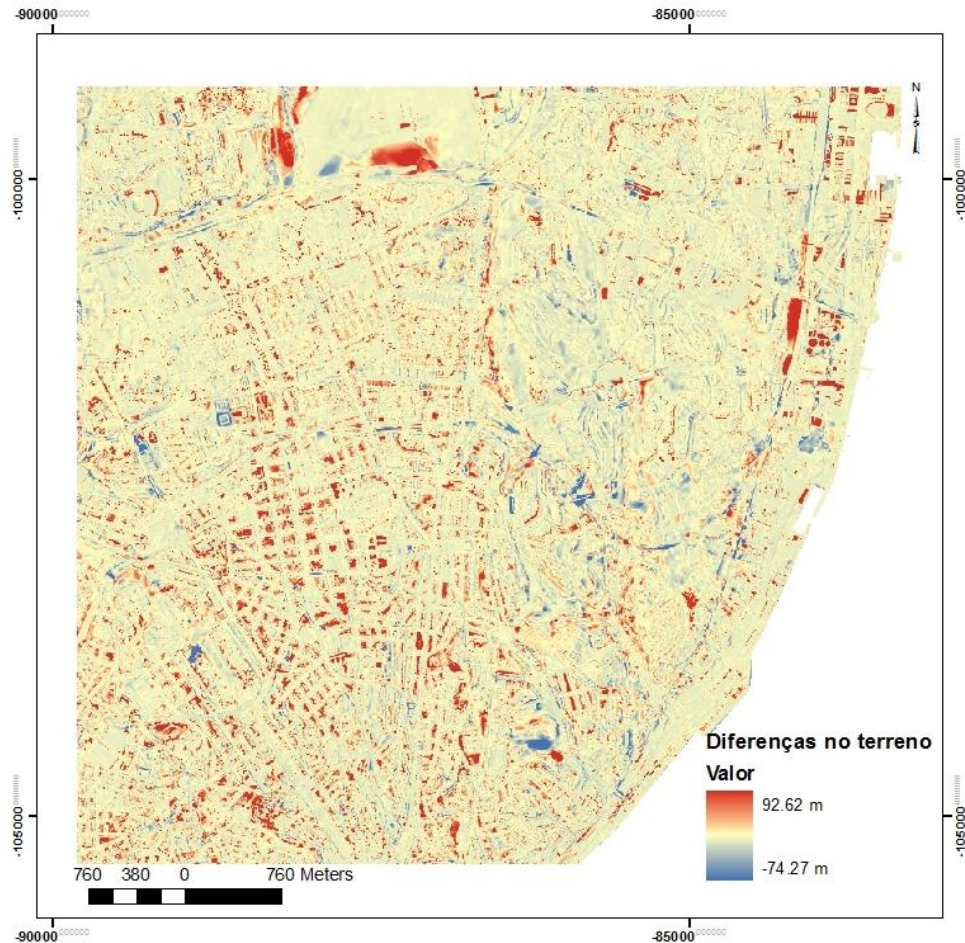
Analisando mais detalhadamente o edificado, verifica-se que para além de alguns edifícios terem sido representados no modelo de superfície com altura a mais ou a menos que no MDS LiDAR, e de alguns edifícios existirem num modelo e não no outro, ou estarem em construção, devido à incoerência temporal entre os dois modelos, existem casos como o do edifício MARCONI (Figura – 36), cuja altura não é a mesma para todo o edifício, e no modelo de superfície foi classificado apenas com uma altura para todo o edifício com diferenças positivas de cerca de 16 m e negativas de cerca de -23 m. Os valores mais discrepantes, *outliers*, dizem também respeito a limites de edifícios altos, que representados pelos polígonos que foram utilizados na construção do modelo de superfície têm limites ligeiramente diferentes que no DSM LiDAR.



**FIGURA 36. EXEMPLO DO EDIFÍCIO MARCONI**

### 4.5.2 Diferenças no terreno

Da análise das diferenças referentes ao terreno, não considerando o edificado, obtiveram-se resultados (Figura – 37) com valores entre os -74,27 m e os 92,62 m, também estes valores *outliers* (Figura – 38), um valor médio de 0,66 m e um desvio padrão de 2,81 m.



**FIGURA 37. DIFERENÇAS NO TERRENO ENTRE O MDS LiDAR E O MODELO DE SUPERFÍCIE**

Após uma análise mais pormenorizada constatou-se que as diferenças que se destacam dizem respeito a movimentos de terra (aterros e escavações), túneis (Figura – 39), viadutos, muros e árvores. Os valores mais discrepantes dizem respeito, tal como nas diferenças a nível do edificado, a zonas limites entre os edifícios e o terreno, que são consideradas edifício no modelo de superfície e terreno no MDS LiDAR.

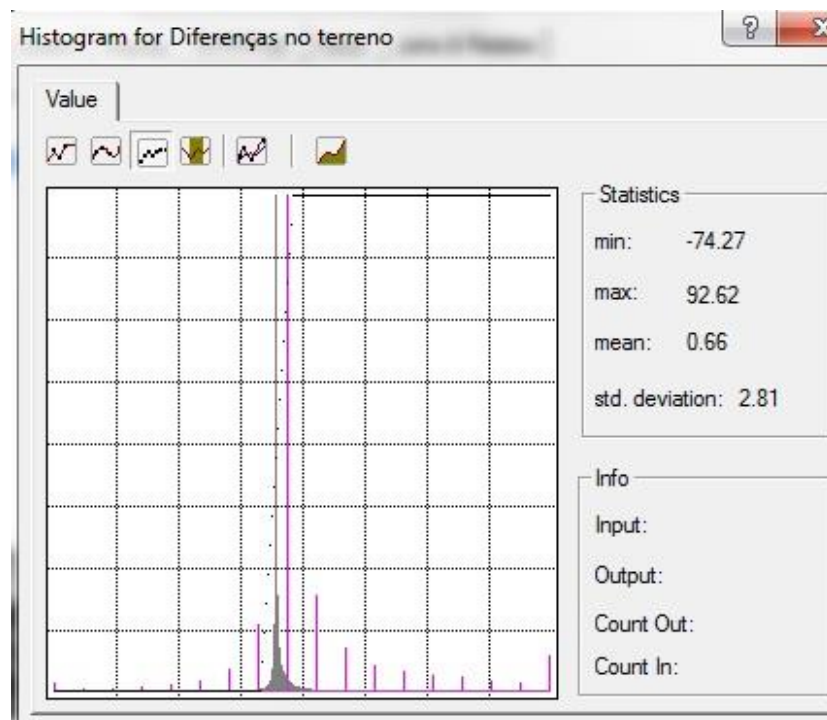


FIGURA 38. HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS NO TERRENO

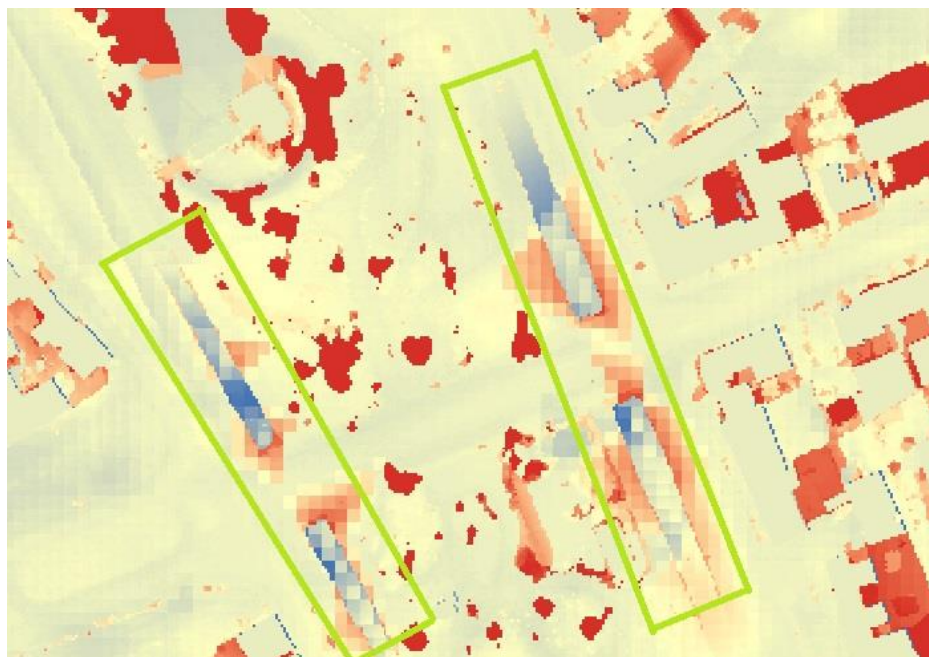


FIGURA 39. DESTAQUE DE DIFERENÇAS ENCONTRADAS



## 4.6 Modelação hidrológica

Para a concretização do mapeamento das inundações urbanas foi necessário recorrer a *software* de modelação hidrológica, uma vez que as ferramentas integradas no *software* ArcGIS não permitem fazê-lo.

A integração da informação relativa aos valores de precipitação e a sua combinação com os resultados obtidos anteriormente, as linhas de água sobre o edificado e a impermeabilidade dos solos, foi efetuada utilizando uma metodologia (Figura - 40) baseada no trabalho de Mosuro, [2012], que requer a utilização de dois programas, HEC-HMS e HEC-RAS [USACE, 2010] e de duas ferramentas desenvolvidas para ArcGIS, HEC-GeoHMS e HEC-GeoRAS [USACE, 2011]. Todos eles são provenientes e foram desenvolvidos pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE). Trata-se de um processo com quatro etapas em geral, as quais são detalhadamente explicadas nos pontos subsequentes.

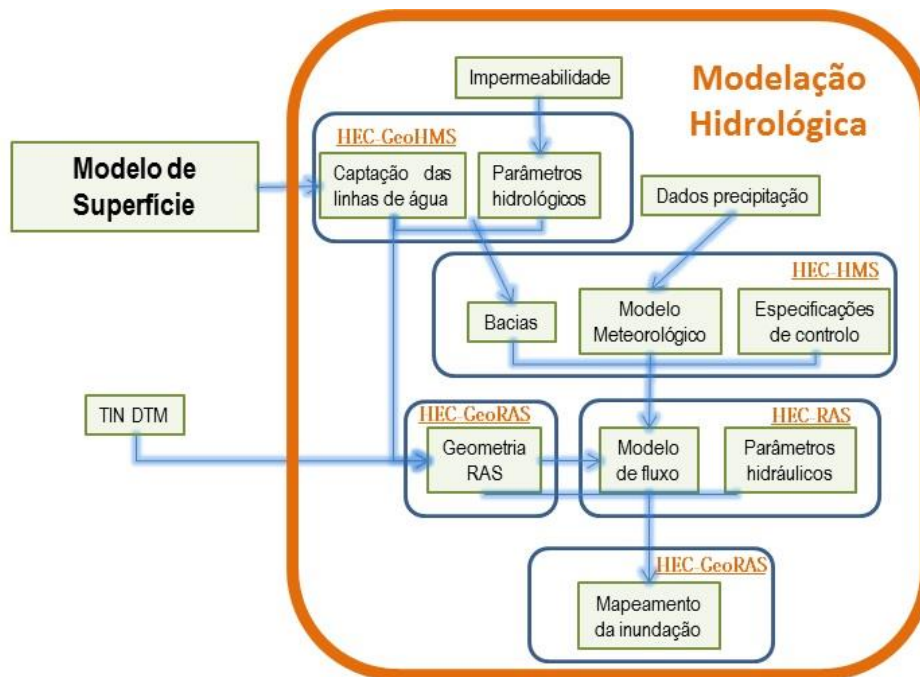


FIGURA 40. METODOLOGIA APLICADA NA CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Nesta fase, inicialmente, foram individualizadas as várias bacias hidrográficas da cidade através das linhas de água determinadas e definiram-se os métodos de perda e transformação de água a aplicar ao modelo, onde se enquadra a etapa referente à determinação dos níveis de impermeabilidade dos solos para a cidade de Lisboa. Posteriormente, a cada bacia, representada por um grafo explicativo do escoamento da água pela bacia, foi associado um modelo meteorológico correspondendo a determinados níveis de precipitação considerados para a cidade, de onde resultaram valores de acumulação de água, em volume, para cada um dos



elementos constituintes do grafo. Desta informação resultante, foi selecionada a que diz respeito ao início de cada linha de água e às zonas onde existem junções de linhas para integrar com uma geometria definida a partir do terreno e desta forma determinar a quantidade de inundação em cada zona da cidade, consoante os vários cenários de inundação averiguados.

#### 4.6.1 Definição das bacias hidrográficas

A fase correspondente à definição das bacias hidrográficas diz respeito a todo o processo que foi necessário realizar para determinar cada uma das bacias, desde a fase de aquisição relativa às linhas de água, a partir do modelo de superfície, até à preparação da informação de cada bacia para exportar e importar na nova fase de trabalho. Tratou-se também de uma parte correspondente aos parâmetros hidrológicos, onde é explicado todo o processo de aquisição da informação para construir a carta de impermeabilidade dos solos, e onde foram definidos os métodos de perda e transformação da água a considerar neste projeto (Figura – 41).

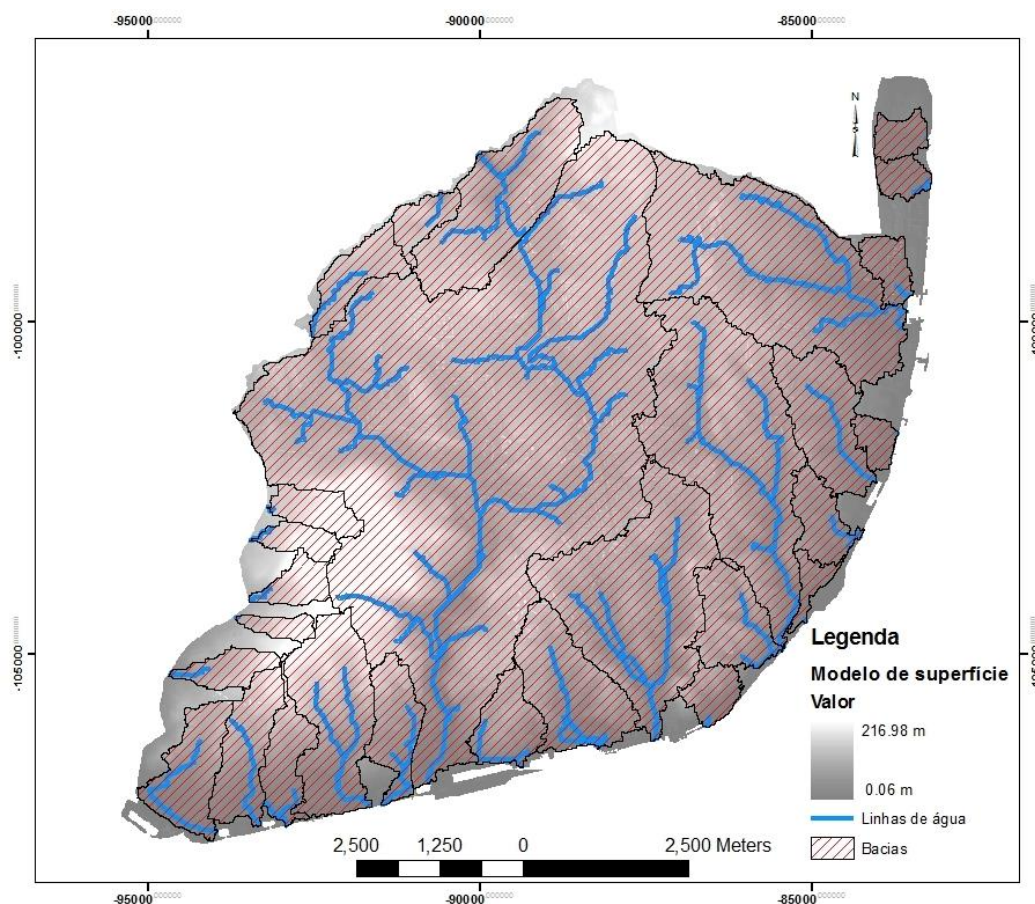


FIGURA 41. ESQUEMATIZAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

##### 4.6.1.1 Captação das linhas de acumulação de água e determinação das bacias

A execução deste processo implicou que se procedesse novamente à determinação das linhas de acumulação de água, desta vez utilizando as funções disponibilizadas pela ferramenta HEC-GeoHMS. Testou-se a utilização das linhas de acumulação de água determinadas anteriormente mas não foi possível prosseguir uma vez que esta ferramenta exige que todo o processo hidrológico que foi anteriormente efetuado no ArcGIS seja agora criado pela própria ferramenta, de uma forma mais automática, sem a intervenção do utilizador na definição de quaisquer valores.

Desta forma, a partir do modelo de superfície, foram efetuadas as operações necessárias à obtenção das linhas de acumulação de água. As células caracterizantes das linhas de acumulação detetadas foram classificadas cada uma delas com um valor de fluxo de acumulação e posteriormente esta informação foi dividida em segmentos. Delinearam-se as bacias hidrográficas, ficando estas divididas por sua vez em sub-bacias, cada uma delas correspondente a um segmento. Esta informação foi vetorizada, assim como os segmentos representativos das linhas de acumulação de água. Por último nesta fase, foi feita uma agregação da informação das bacias com a informação do fluxo de água (Figura – 42), um resultado mais simplificado do que foi determinado anteriormente através do processo hidrológico do ArcGIS.



**FIGURA 42. BACIAS HIDROGRÁFICAS E CORRESPONDENTES LINHAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA**

A etapa seguinte consistiu na individualização de cada uma das bacias, sendo cada uma delas considerada como um projeto individual, perfazendo um total de 28 bacias. Esta individualização teve em consideração o ponto de acumulação máximo para cada uma das bacias, designado por *outlet*, para garantir que a área da bacia abrangia toda a área de

escoamento de cada linha de acumulação. Cada linha de acumulação de água definida neste processo passa então a ter uma bacia associada e as áreas que se encontram fora das bacias não são relevantes porque não apresentam linhas de acumulação de água. Para cada uma dessas bacias foram ainda determinados atributos importantes como o comprimento e o declive de cada segmento, o declive médio de cada sub-bacia, a elevação no local mais elevado da bacia e no local menos elevado, e o declive entre esses dois pontos, o centróide da bacia e o centróide do percurso de escoamento mais longo (Figura - 43). Tais atributos serão necessários posteriormente neste processo.



FIGURA 43. ELEMENTOS CONSTITUINTES DE CADA BACIA

### 4.6.1.2 Parâmetros hidrológicos

A fase seguinte consistiu na seleção dos métodos de perda, de transformação e de percurso que vão ser utilizados para modelar a informação, e na inserção dos valores de impermeabilidade do terreno, no modelo. Tais parâmetros podem ser estimados como uma média das sub-bacias ou obtidos com base em *rasters* relativos ao uso do solo. Os parâmetros relacionados com o tempo de concentração ou os parâmetros relativos ao percurso podem ser obtidos a partir do terreno, de dados topográficos ou de precipitação.

#### 4.6.1.2.1 Impermeabilidade dos solos

A tarefa de criação de uma carta de impermeabilização dos solos para a cidade de Lisboa foi dividida em três partes. Na primeira definiram-se os índices de impermeabilidade a aplicar a cada elemento representativo da superfície do terreno, na segunda parte efetuou-se a escolha dos dados a integrar e o tratamento da informação correspondente a cada tipo de dados, preparando-os assim para se tornarem elementos integrantes da carta de impermeabilização. A terceira etapa consistiu na junção de toda a informação tratada e no tratamento das áreas por classificar, por forma a criar uma carta de impermeabilização com uma classificação total do concelho de Lisboa.

##### Determinação dos índices de impermeabilização e correspondentes classes

A gama de índices de impermeabilização utilizada para a construção da carta de impermeabilização tinha de cumprir a condição de não ser demasiado detalhada para facilitar a integração da carta no trabalho em questão, e para efetuar uma classificação a um nível mais geral, passível de ser utilizada em outros estudos e para outros fins.

Adotou-se então uma classificação anteriormente utilizada em outros trabalhos realizados pelo SMPC [Newson, 1992], e expressa na Tabela – 6:

**TABELA 6. CLASSIFICAÇÃO DAS CLASSES DE OBJETOS DO SOLO QUANTO AO ÍNDICE DE IMPERMEABILIZAÇÃO, *NEWSON* 1992**

Descrição	Classificação DPC	Índice de Impermeabilização (%)
Telhados	Edifícios de apartamentos em quarteirão	95
Apartamentos	Edifícios de apartamentos isolados	95
Moradias isoladas	▮ Moradias isoladas	95
	▮ Outras situações	
Rede Viária	▮ <i>Buffers</i> dos eixos de via (2, 5 e 10m)	95
Espaço: Empedrado		60
Alcatroado		85
Espaço Florestal		20
Espaço Verde Urbano		20
Espaço Terraplanado		20
Horta Urbana		15
Inculto clareiras		15

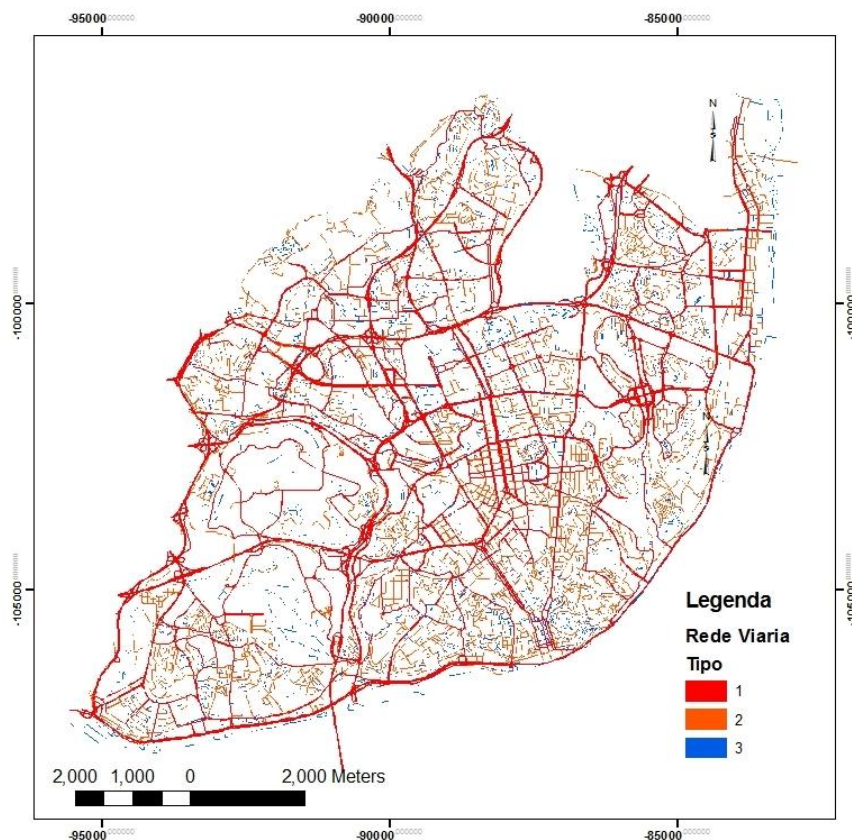
Esta classificação foi adaptada às classes existentes para a criação da atual carta de impermeabilização, de onde surgiu a classificação então atribuída neste trabalho, definida na Tabela – 7:

**TABELA 7. ÍNDICES DE IMPERMEABILIZAÇÃO UTILIZADOS**

Classe	Índice de Impermeabilização (%)
Rede Viária	95
Edificado	95
Rede Ferroviária	60
Cemitérios	20
Estacionamentos e outros	85
Espaços Verdes	15 / 20

### Tratamento dos dados existentes

Primeiramente realizou-se o tratamento da rede viária, através de informação atualizada ao ano de 2014. Anteriormente, esta *shapefile* foi classificada pelo SMPC com as classes 1, 2 e 3 correspondendo à rede viária principal, rede viária secundária e ruas locais, respetivamente. A cada uma delas, segundo estudos feitos anteriormente pelo SMPC, foi aplicado um *buffer*. À rede viária principal aplicou-se um *buffer* de 10 m, à rede secundária um *buffer* de 5 m e às ruas locais um *buffer* de 2 m. Para a realização deste processo a *shapefile* inicial foi repartida em 3 e no final voltaram a juntar-se numa só (Figura - 44). Adicionou-se posteriormente o atributo que vai corresponder ao índice de impermeabilização, neste caso de 95% para toda a rede viária.



**FIGURA 44. CLASSIFICAÇÃO DA REDE VIÁRIA**

O segundo tema considerado para integrar a carta de impermeabilização foi o edificado. À informação considerada não se efetuou qualquer tratamento uma vez que se consideraram todos os elementos e não foi feita qualquer distinção na sua tipologia pois a todos corresponde o nível de impermeabilização de 95%. De seguida juntou-se a informação do edificado com a informação da rede viária.

Seguiu-se o tratamento da informação referente à rede ferroviária. Foi aplicado um *buffer* de 5 m a toda a rede e esta foi intersectada com a rede viária para fazer um tratamento minucioso nas zonas em que estas duas redes se intersectavam. Para tal, considerou-se o apoio de um ortofotomapa da cidade referente ao ano de 2011. O resultado desta operação foi posteriormente junto à *shapefile* com a informação existente da rede viária e do edificado. A informação referente à rede ferroviária foi classificada com um nível de impermeabilização de 60%.

De seguida adicionou-se a informação referente aos cemitérios existentes na cidade. A este tema foi atribuído o índice de impermeabilização de 20%.

O tema seguinte a ser tratado foi o dos parques de estacionamento, classificados com um índice de impermeabilização de 85%.

Posteriormente considerou-se o tema relativo aos espaços verdes. Neste, o índice de impermeabilização atribuído a cada polígono variou entre 15% e 20% consoante a tipologia associada a cada um, como se encontra estipulado na Tabela - 8:

**TABELA 8. ÍNDICES DE IMPERMEABILIZAÇÃO ATRIBUÍDOS AOS VÁRIOS TIPOS DE ESPAÇOS VERDES**

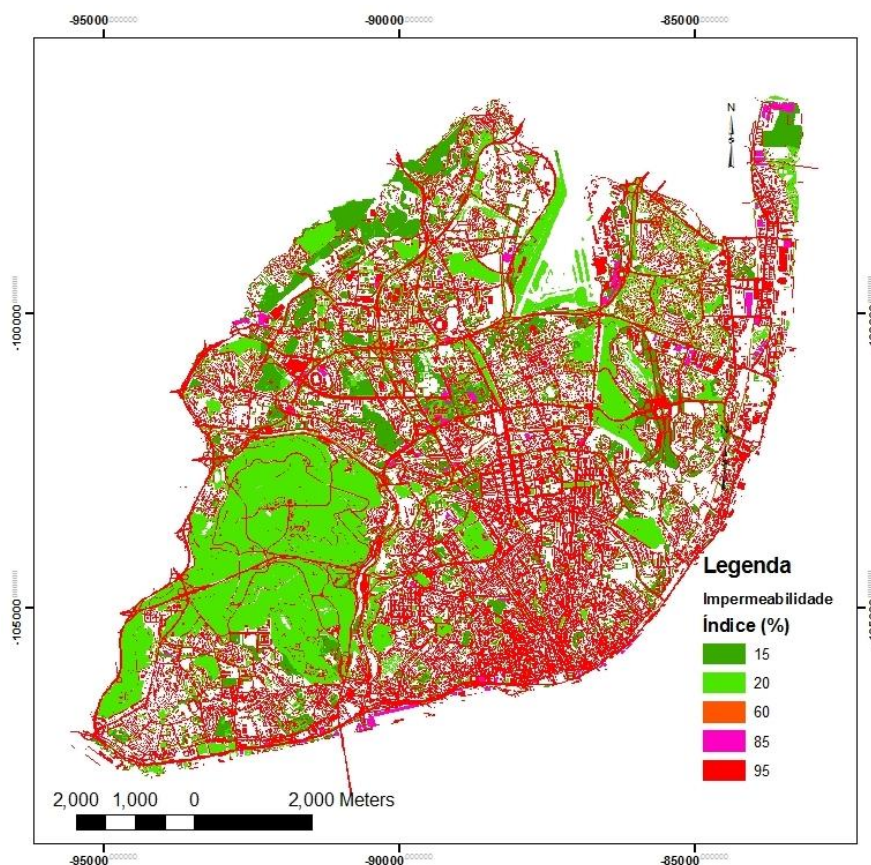
Tipologia	Índice de Impermeabilização (%)
Regime florestal total ou parcial	20
Parque urbano	20
Jardins	20
Área expectante	15
Área de produção / viveiros	20
Cemitérios	20
Enquadramento residencial	20
Enquadramento residencial contínuo	20
Enquadramento de equipamento	20
Enquadramento de monumento ou equipamento nobre	20
Área residual	15
Área de proteção e conservação	20
Área concessionada	20
Parque recreativo	20
E.P. Recreativo e produção	20
E.V. Proteção e conservação	20
Escola	20
Enquadramento de vias	20



Os polígonos que não estavam classificados quanto à sua tipologia foram classificados individualmente, tendo em conta os polígonos vizinhos relativos a espaços verdes e através de visualização no ortofotomapa de 2011.

Ainda relativo aos espaços verdes, consideraram-se também os espaços classificados como áreas de intervenção da DMAU, aos quais foi atribuído um índice de impermeabilização de 15% e, posteriormente juntou-se o resultado dessa operação à informação classificada, eliminando primeiro as sobreposições. Desta forma obteve-se um ficheiro final para todos os espaços verdes classificados.

Por último, juntou-se toda a informação até aqui classificada num só ficheiro (Figura - 45): redes viária e ferroviária, edificado, cemitérios, estacionamentos e espaços verdes, eliminando sempre as sobreposições existentes entre as *shapefiles* para garantir que a cada área corresponde apenas um valor de impermeabilização.



**FIGURA 45. INFORMAÇÃO EXISTENTE CLASSIFICADA QUANTO À IMPERMEABILIZAÇÃO**

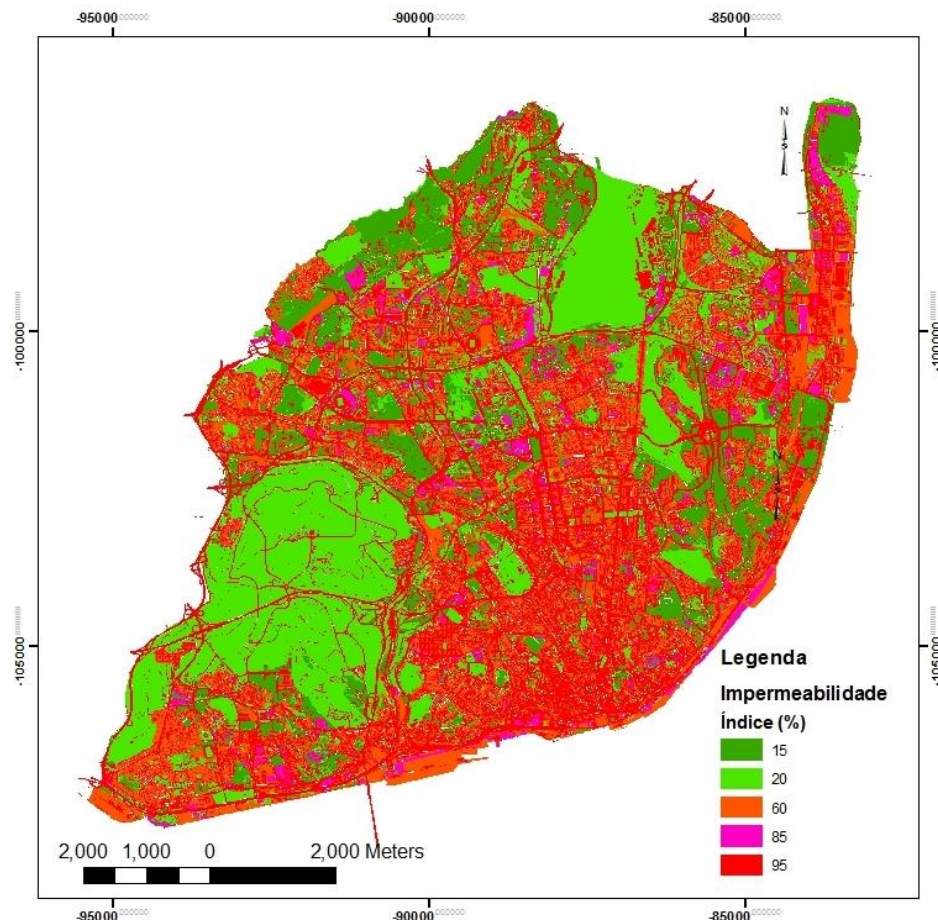


### Classificação do espaço restante e criação da carta de impermeabilidade dos solos

Os temas possíveis de utilizar encontram-se nesta fase classificados, no entanto existe ainda espaço que não está classificado e é preciso ser tratado.

Através da utilização dos limites definidos pelas BGRI de 2011, para Lisboa e Loures, foi possível resolver essa questão. No *software QuantumGIS* [QGIS Project, 2014] procedeu-se à atribuição de um índice de impermeabilização a cada uma das áreas por classificar, tendo em consideração os espaços já classificados e utilizando o *OpenStreetMap* [QGIS Project, 2014], que permite visualizar num mapa híbrido a localização e a constituição de cada polígono a classificar. Tal operação poderia ter sido realizada também no *software ArcGIS*, utilizando um ortofotomapa atualizado para efetuar a visualização do espaço.

Após a classificação total dos polígonos, a informação aqui classificada foi unida com os polígonos classificados anteriormente. De seguida, para confirmar se todos os espaços tinham um índice de impermeabilização atribuído efetuou-se uma subtração da *shapefile* da informação classificada com a *shapefile* da CAOP, zona do concelho de Lisboa, confirmando-se que não existiam espaços por classificar. Através deste processo obteve-se então a carta de impermeabilização dos solos para a cidade de Lisboa (Figura – 46), que foi posteriormente convertida numa estrutura raster com resolução de 1 m.



**FIGURA 46. CARTA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DOS SOLOS PARA LISBOA**

#### 4.6.1.2.2 Métodos de perda e transformação da água

Para a perda e para a transformação da água foi selecionado o método *SCS Curve Number* desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture (USDA) Soil Conservation Service (SCS)*. É um método simples, eficiente e muito utilizado que permite determinar a quantidade aproximada do escoamento causado por um determinado evento de precipitação. Para a sua determinação apenas é necessário saber a quantidade de precipitação e o número de escoamento – *Curve Number (CN)* [Hawkins et al., 2002] que será determinado posteriormente neste processo.

O método selecionado para modelar os percursos foi o método *Muskingum* que é utilizado em situações que requerem uma relação de armazenamento de descarga variável [Chow et al., 1988]. Este método vai então estimar o volume de armazenamento dentro de um canal através de uma série de recipientes em forma de prismas e cunhas (*wedge and prism storage*) (Figura – 47). A parte do prisma corresponde a um volume de armazenamento regular onde a entrada e a saída do fluxo são iguais. A parte da cunha representa o armazenamento positivo ou negativo que ocorre durante a passagem de uma onda de inundação. Quando o fluxo de entrada é superior ao fluxo de saída tem-se um armazenamento positivo, quando o contrário acontece, trata-se de um armazenamento negativo [COMET Program, 2010].

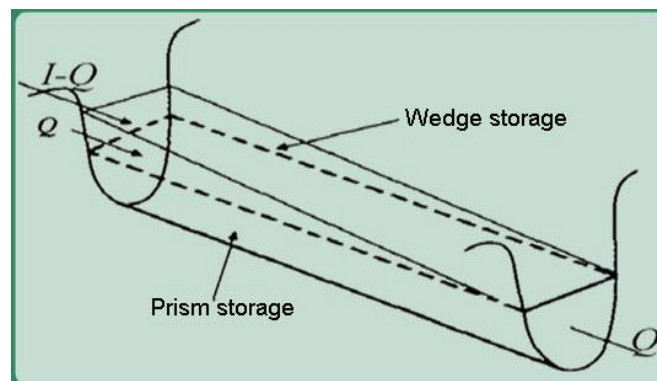


FIGURA 47. WEDGE AND PRISM STORAGE

Nesta fase, cada uma das linhas de acumulação e cada uma das sub-bacias foram ainda identificadas com um nome único.

Utilizando a inserção de parâmetros a partir de um *raster*, foi adicionada a informação relativa à impermeabilidade dos solos. Neste processo, para cada sub-bacia foi efetuada uma

média do valor da impermeabilidade, valor que foi posteriormente utilizado para caracterizar a impermeabilização em cada uma das sub-bacias.

A determinação do número de escoamento deveria ser efetuada através de uma tabela que para cada polígono do terreno combinaria a informação da impermeabilidade com a informação do uso do solo. No entanto, na falta de informação pormenorizada sobre o uso do solo, e sendo este um processo que consumiria bastante tempo resolveu-se atribuir o mesmo valor para todo o espaço, podendo este processo ser posteriormente aperfeiçoado como perspectiva futura. Desta forma, e sabendo que o número de escoamento se encontra entre os valores de 30 e 100, correspondendo os valores mais altos a valores que conduzem a um maior escoamento, com perdas mínimas, e os valores mais baixos a um aumento da capacidade do solo para reter a água precipitada, produzindo um menor escoamento [HydroCAD, 2015], optou-se por utilizar como valor de teste o valor 95 para garantir a existência de escoamento. Selecionou-se ainda o método *CN Lag Method* como método de retardamento para cada uma das bacias, que é calculado através dos parâmetros declive (Y), número de escoamento (CN), o comprimento hidráulico da sub-bacia hidrográfica (L) e do potencial máximo de retenção da bacia (S).

$$Lag = \frac{L^{0.8} * (S+1)^{0.7}}{(1900 * Y^{0.5})} \quad , \quad S = \frac{100}{CN} - 10 \quad (7)$$

Por último nesta fase, as várias bacias foram preparadas, uma por uma, para serem exportadas para o *software* HEC-HMS onde se procedeu à construção do modelo meteorológico. As unidades dos valores foram todas convertidas em unidades SI, verificou-se se não existiam erros nas bacias, adicionaram-se coordenadas às tabelas de atributos e a informação pertinente dos elementos hidrológicos, sua conectividade e parâmetros relacionados foram transformados em grafos (Figura – 48), para serem trabalhados na fase seguinte. Tal informação foi então convertida para um ficheiro ASCII para ser compatível com o *software* HEC-HMS.

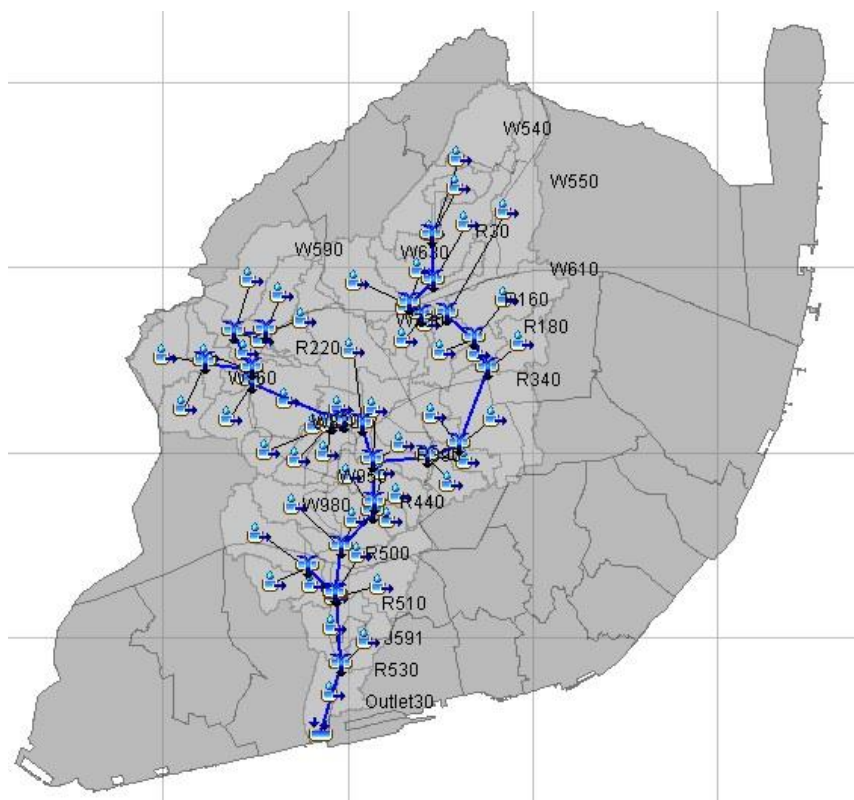


FIGURA 48. CONVERSÃO DA INFORMAÇÃO DE CADA BACIA EM GRAFO

#### 4.6.2 Modelação dos dados da precipitação

A criação do modelo meteorológico a ser utilizado foi efetuada utilizando o *software* HEC-HMS, um programa apropriado para simular os processos hidrológicos completos de sistemas de bacias hidrográficas dendríticas. Para além da importação dos grafos das bacias, foi necessário criar o modelo meteorológico e as especificações de controlo do modelo (Figura – 49).

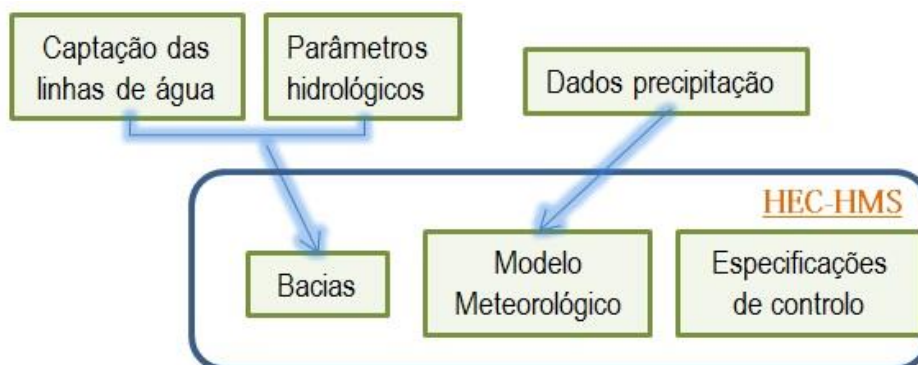


FIGURA 49. ESQUEMATIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO MODELO METEOROLÓGICO

#### 4.6.2.1 Bacias – Estimação dos parâmetros hidrológicos

Após importar os grafos das bacias para o HEC-HMS foi necessário verificar os parâmetros que faltavam ser preenchidos. Relativamente aos parâmetros de perda e transformação, não foi necessário intervir nesta fase pois tais valores vêm importados conjuntamente com o grafo, da etapa anterior.

Para o parâmetro correspondente à perda inicial que representa a perda da precipitação por interceção através da vegetação ou de qualquer outro obstáculo, utilizou-se o valor 0. Os parâmetros relativos ao percurso, *Muskingum K* e *Muskingum X* dizem respeito ao tempo de percurso e ao coeficiente de ponderação, respetivamente. O valor de X depende do formato *wedge storage* para ser modelado e varia entre 0 para um armazenamento tipo reservatório e 0.5 para um *wedge* cheio. Em fluxos naturais, X encontra-se entre 0 e 0.3, com um valor médio próximo de 0.2 [Chow *et al.*, 1988]. O valor K representa o tempo necessário, em horas, para que uma “onda” de inundação periódica percorra a sua totalidade e pode ser estimado como o tempo observado de viagem do pico de fluxo através do alcance [Chow *et al.*, 1988]. Assim optou-se por utilizar o valor de 0.2 para o coeficiente de ponderação e no caso do valor do tempo do percurso, tal como no caso do número de escoamento, selecionou-se um valor fixo para todos os casos, o valor de 0.06 horas, que pode posteriormente ser aperfeiçoado como perspetiva futura.

Relativamente ao valor da perda inicial e ao valor K do tempo do percurso, testaram-se também os valores de 0.05 e 0.4 respetivamente e não se verificaram quaisquer alterações nos valores do resultado final, mantendo assim os valores usados inicialmente, uma vez que se conclui que não são muito influentes no modelo meteorológico.

Ficando assim com os parâmetros relativos às bacias todos determinados, prosseguiu-se para a construção do modelo meteorológico.

#### **4.6.2.2 Modelação da precipitação e especificações de controlo**

Os dados meteorológicos relativos à precipitação disponibilizados para utilização neste trabalho foram recolhidos por estações meteorológicas localizadas na cidade de Lisboa: a estação Geofísico e a estação Gago Coutinho. De acordo com a tabela de períodos de retorno apresentada no Anexo A [Brandão *et al.*, 2001] e utilizada pelo SMPC, que representa a probabilidade de determinada ocorrência de precipitação voltar a acontecer e onde são apresentados valores de precipitação já ocorridos na cidade, foram selecionados 2 casos para utilizar: uma ocorrência com período de retorno de 2 anos, e outra com período de retorno de 10 anos, para poder fazer uma comparação entre duas situações com diferente grau de influência na cidade. Os valores registados pelas duas estações para estes dois casos são bastante idênticos, diferenciando apenas em 0.3 mm no caso do período de retorno de 2 anos e em 0.7 mm para o período de retorno de 10 anos. Uma vez que o programa apenas permite utilizar um valor de precipitação para cada modelo meteorológico, optou-se pelos valores registados na estação Gago Coutinho por serem os valores mais elevados e que vão contribuir para uma maior acumulação de água à superfície.

Definindo os valores a utilizar, passou-se à determinação das especificações de controlo. Determinou-se então que se iria representar um período de precipitação de 1 hora, correspondendo exatamente ao intervalo de tempo das 00:00 às 01:00 do dia 1 de janeiro de 2014. É de notar que estes dados foram escolhidos aleatoriamente, apenas porque são exigidos pelo programa, e em nada interferem nos resultados obtidos pelo modelo. Definiu-se ainda que o intervalo de tempo em que são registados valores de precipitação corresponde a 5 minutos.

Prosseguiu-se de seguida à construção das duas séries de dados temporais, cada uma delas correspondente a um período de retorno, representadas através de milímetros acumulativos. Como para cada um dos casos apenas se dispõe do valor acumulado ao fim de uma hora, foi necessário simular valores para o intervalo de 1 hora, atingindo o valor tabulado no final. Os valores simulados encontram-se expressos na Tabela – 9.

**TABELA 9. VALORES DE PRECIPITAÇÃO UTILIZADOS NO INTERVALO DE 1 HORA, PARA OS PERÍODOS DE RETORNO CONSIDERADOS**

<b>Hora</b>	<b>Período de Retorno 2 Anos (mm)</b>	<b>Período de Retorno 10 Anos (mm)</b>
<b>00:00</b>	0.0	0.0
<b>00:05</b>	6.8	12.2
<b>00:10</b>	9.5	16.4
<b>00:15</b>	11.6	19.5
<b>00:20</b>	12.9	23.3
<b>00:25</b>	14.0	24.9
<b>00:30</b>	16.2	26.2
<b>00:35</b>	16.7	27.1
<b>00:40</b>	17.0	27.9
<b>00:45</b>	17.5	28.8
<b>00:50</b>	18.1	30.1
<b>00:55</b>	18.9	31.3
<b>01:00</b>	19.5	32.7

Criaram-se de seguida dois modelos meteorológicos, para associar a cada um as duas séries temporais. Para o modelo meteorológico correspondente ao período de retorno de 2 anos ativou-se a série de dados temporais do período de retorno de 2 anos, para cada uma das bacias, e o mesmo foi feito para o modelo meteorológico correspondente ao período de retorno de 10 anos, utilizando a série de dados temporais de período de retorno de 10 anos.

Tendo os modelos meteorológicos construídos e a informação relativa aos vários parâmetros preenchidos, determinaram-se os resultados dos modelos meteorológicos, bacia a bacia, obtendo os valores de acumulação para cada um dos elementos de cada uma das bacias (Figura – 50).



Global Summary Results for Run "HMS2_PR2A"				
Project: HEC HMS    Simulation Run: HMS2_PR2A				
Start of Run: 01Jan2014, 00:00		Basin Model: HMS_2		
End of Run: 01Jan2014, 01:00		Meteorologic Model: 2pr		
Compute Time: 25Fev2015, 23:33:36		Control Specifications: ControlSP		
Show Elements:	All Elements	Volume Units:	<input type="radio"/> MM <input checked="" type="radio"/> 1000 M3	Sorting: Hydrologic
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
W 1060	0.732796	2.8	01Jan2014, 01:00	4.8
W 1050	0.413367	2.0	01Jan2014, 00:40	4.6
W 1040	0.685837	2.7	01Jan2014, 00:50	5.7
W 1030	0.000393	0.0	01Jan2014, 00:45	0.0
W 1020	0.657779	2.9	01Jan2014, 00:50	6.1

Global Summary Results for Run "HMS2_PR10A"				
Project: HEC HMS    Simulation Run: HMS2_PR10A				
Start of Run: 01Jan2014, 00:00		Basin Model: HMS_2		
End of Run: 01Jan2014, 01:00		Meteorologic Model: 10pr		
Compute Time: 25Fev2015, 23:35:52		Control Specifications: ControlSP		
Show Elements:	All Elements	Volume Units:	<input type="radio"/> MM <input checked="" type="radio"/> 1000 M3	Sorting: Hydrologic
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
W 1060	0.732796	4.7	01Jan2014, 01:00	8.4
W 1050	0.413367	3.6	01Jan2014, 00:35	8.1
W 1040	0.685837	4.9	01Jan2014, 00:45	10.5
W 1030	0.000393	0.0	01Jan2014, 00:45	0.0
W 1020	0.657779	5.0	01Jan2014, 00:45	10.7

FIGURA 50. RESULTADOS DO MODELO METEOROLÓGICO

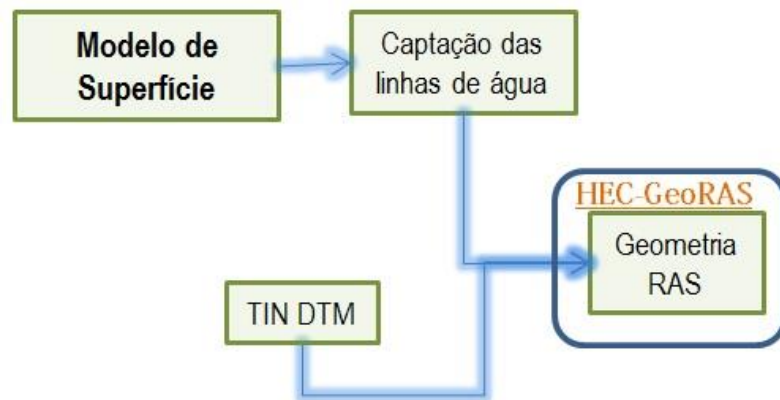
Todos os valores de acumulação calculados através deste processo foram guardados num ficheiro \*.dss, o que permitiu transportar e utilizar os valores posteriormente no modelo de fluxo criado na etapa seguinte, para determinar a quantidade de inundação.

### 4.6.3 Construção da geometria

A construção da geometria sobre a qual posteriormente vai ser feita a modelação do fluxo de água e que vai ser considerada na determinação da inundação, foi realizada através da utilização da ferramenta HEC-GeoRAS que corre sobre o *software* ArcGIS (Figura – 51). É importante referir que tanto esta ferramenta como o *software* que será utilizado na etapa seguinte foram desenvolvidos no sentido de analisar inundações e cheias em rios. Não são totalmente apropriados para determinar inundações em espaço urbano, mas devido à inexistência de programas apropriados para esse fim, é aqui testada uma adaptação o mais



próxima possível, destes *software* para determinar inundações por precipitação em espaço urbano.



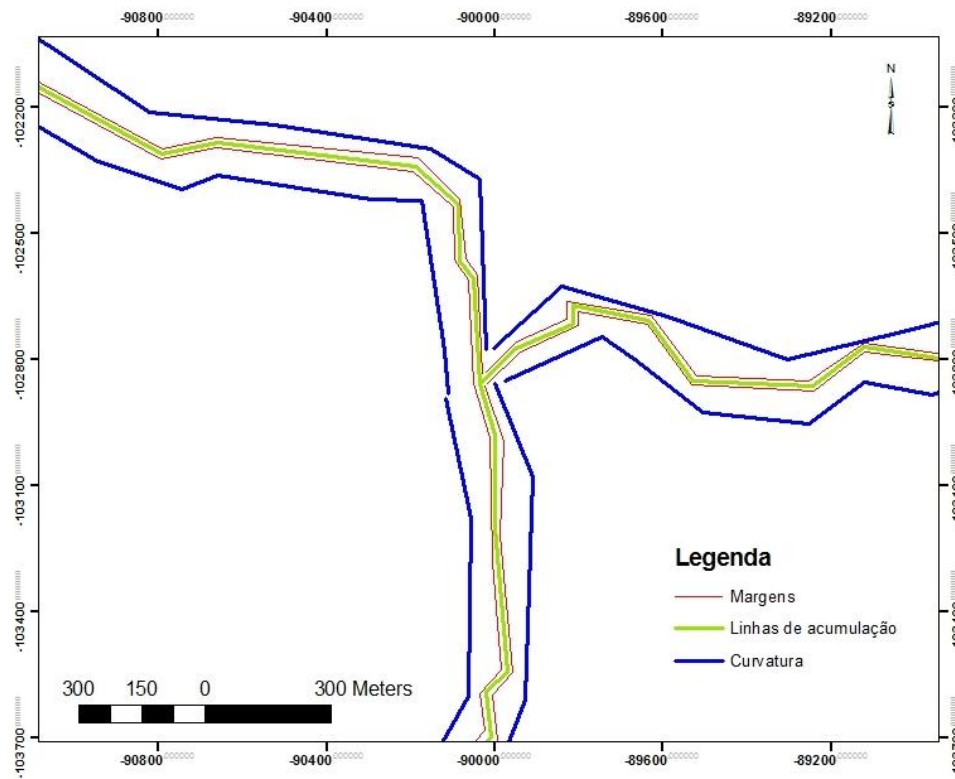
**FIGURA 51. ESQUEMATIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA**

A aquisição da informação para esta etapa foi feita a partir do TIN do MDT, por incapacidade do computador em criar um TIN do modelo de superfície. Sobre este foram digitalizadas as linhas de acumulação de água classificadas com nível de importância 5 e 6, ou seja, só se digitalizaram as linhas que acumulam mais água. Esta digitalização teve de ser realizada pelo utilizador, não sendo possível a sua substituição pelas linhas determinadas anteriormente, porque o processo de criação da geometria assim o exige. Foi necessário ter em atenção o sentido do fluxo porque é o sentido da digitalização que determina o sentido para onde a água vai escoar. Depois de todas as linhas de acumulação de água terem sido digitalizadas, a cada uma delas é atribuído um identificador único, e de seguida, para as que se ligam umas às outras, são definidas as junções, para permitir que a água vá escoar para a linha de acumulação de água seguinte. Criou-se ainda a topologia para estas linhas.

O processo seguiu-se com a definição das margens do rio. É um passo que não se aplica ao caso deste projeto uma vez que se está a trabalhar sobre linhas de água em meio urbano e não em rios com margens definidas, mas que não pode ser ignorado. Para tentar minimizar ao máximo o impacto que este passo possa ter na determinação da zona inundada, uma vez que estamos a trabalhar locais que só inundam quando existe precipitação excessiva mas que não contêm água em ambiente normal, tentou-se criar as margens o mais junto possível das linhas de acumulação que foram digitalizadas.

De seguida foram criadas as linhas que vão determinar a curvatura das linhas de acumulação de água (Figura – 52). Estas vão definir o perfil do rio assimilando as suas curvas a montante e a jusante e as zonas retas, necessário para as secções transversais que serão de

seguida criadas. É necessário definir para cada uma, se esta está do lado esquerdo ou do lado direito da linha de acumulação de água.



**FIGURA 52. LINHAS DE ACUMULAÇÃO, MARGENS E LINHAS DEFINIDORAS DA CURVATURA**

As secções transversais consistem em linhas criadas perpendicularmente às linhas de acumulação de água, com um intervalo e um comprimento definido. Estas secções traçam perfis do terreno e é sobre elas que vai ser criada a inundação, sendo depois modelada para o espaço entre cada duas secções tendo em conta o valor de inundação determinado para cada uma e a curvatura entre as duas secções. Estas secções poderiam ter sido traçadas manualmente, no entanto, como se está na presença de várias linhas de água com uma extensão significativa, optou-se pela criação automática das secções, considerando um intervalo de 25 m e um comprimento de 200 m. Contudo, devido à curvatura das linhas de acumulação de água, foi necessário submeter as secções a uma edição, para garantir que nenhuma delas atravessava mais que uma vez cada um dos elementos (linhas de acumulação de água, margens e linhas de curvatura), nem que se sobrepunham umas com as outras. Caso esse tratamento não fosse realizado, não era possível criar a topologia das linhas e avançar com o processo.

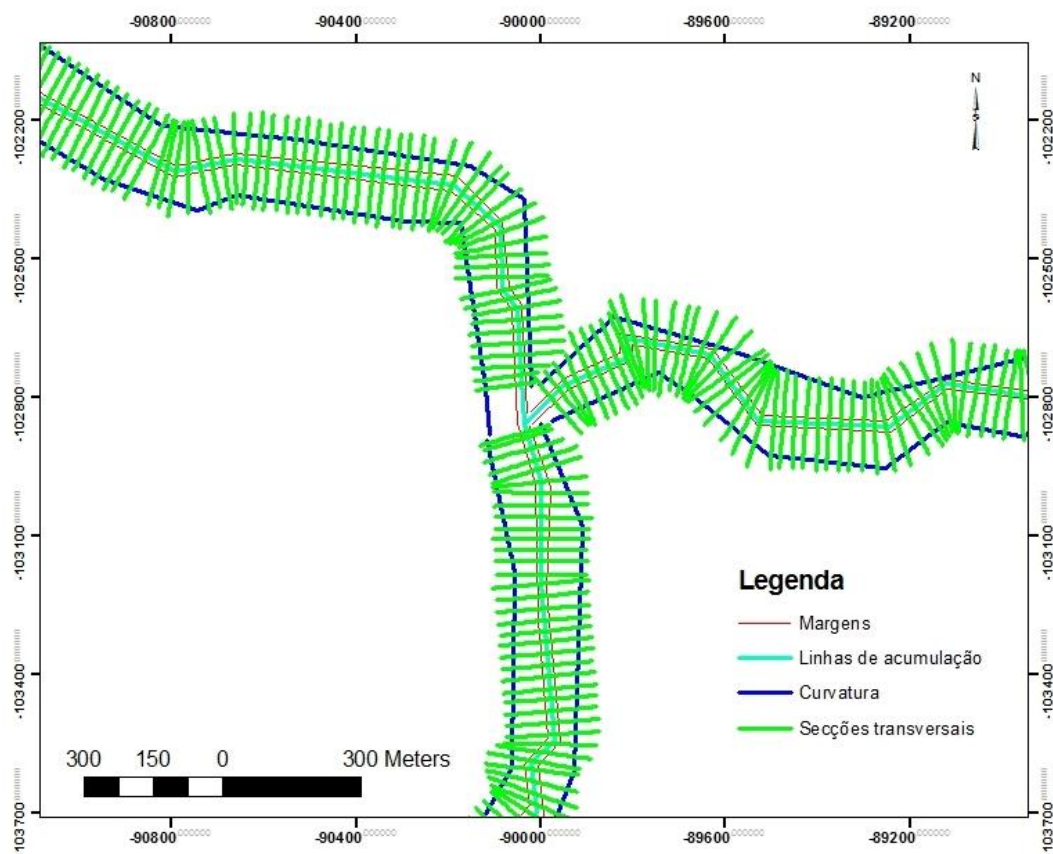


FIGURA 53. SECÇÕES TRANSVERSAIS

Após o tratamento das secções transversais (Figura – 53), e de ter sido criada a sua topologia, estas foram preparadas para exportar e utilizar na fase seguinte.

#### 4.6.4 Modelação da área de inundação

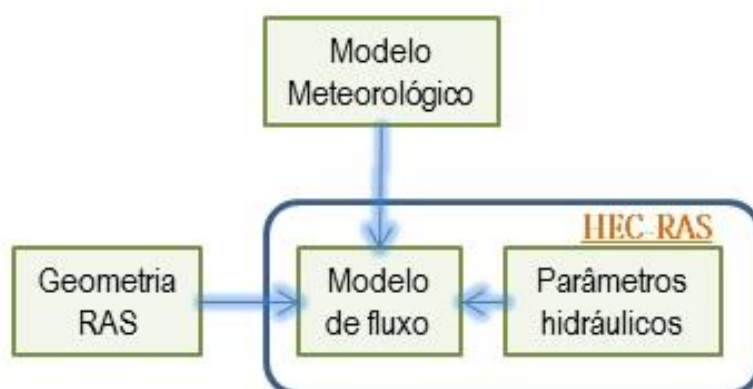


FIGURA 54. ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE MODELAÇÃO DA ÁREA DE INUNDAÇÃO

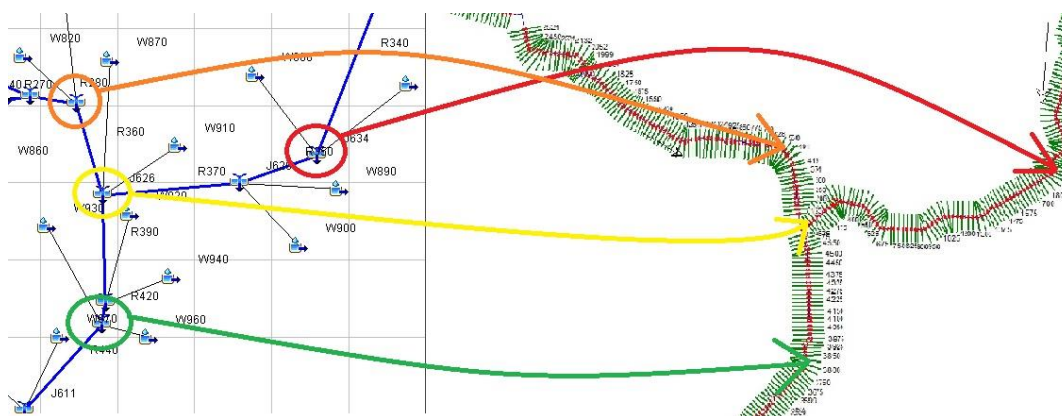
A determinação da zona que vai inundar consoante os níveis de precipitação ocorridos, foi realizada através da utilização do *software* HEC-RAS, apropriado para executar cálculos hidráulicos unidimensionais para uma rede hidrográfica de canais naturais e artificiais.

Para conseguir proceder à modelação do fluxo de água foi necessário combinar a informação proveniente do modelo meteorológico com a geometria criada no passo anterior e também ainda definir determinados parâmetros hidráulicos necessários como o coeficiente de rugosidade e as condições de fronteira (Figura – 54).

A geometria criada na etapa anterior foi importada para o projeto a conceber no *software* HEC-RAS tendo o cuidado de se definir que as unidades dos dados se encontravam no sistema SI. Após ter a geometria inserida no projeto foi necessário definir o coeficiente de rugosidade atribuída a cada secção transversal. Este valor pode diferir em três zonas da secção, a zona entre as margens e as zonas para além delas, de cada um dos lados, e vai depender do tipo de solo que atravessa. Tentou-se calcular este valor no HEC-GeoRAS através da utilização dos polígonos da impermeabilidade, no entanto cada secção transversal atravessava mais do que uma vez o mesmo polígono e o *software* não permitiu que essa operação fosse feita. Desta forma resolveu-se atribuir a todas as secções transversais o valor médio de todos os valores de rugosidade que classificam os elementos presentes no terreno [adaptado de Chow, 1959], consoante o grau de impermeabilidade, obtendo assim o valor de 0.05 para o coeficiente de rugosidade a aplicar às secções transversais.

Neste ponto ficou-se com a informação relativa à geometria completa, e passou-se à fase de modelação do fluxo de água. Optou-se pela utilização de um modelo de fluxo constante porque a criação de um modelo de fluxo não constante implicava que as propriedades hidráulicas fossem examinadas para cada uma das secções, sendo este um processo demasiado demorado uma vez que a geometria é composta por 1184 secções transversais.

Assim, utilizando a modelação constante do fluxo de água, os valores de acumulação de água calculados anteriormente foram adicionados às respetivas secções, acedendo ao ficheiro \*.dss onde os resultados obtidos no HEC-HMS foram guardados. Os valores de acumulação foram adicionados à geometria através de uma ligação entre cada uma das secções transversais e os locais onde nos grafos existem inícios ou junções de linhas de acumulação correspondentes (Figura – 55). Foram importados para cada secção transversal os valores que dizem respeito a cada 5 minutos do total de 1 hora de precipitação, tal como foram determinados anteriormente. Este processo foi repetido para cada um dos cenários de período de retorno considerados, 2 anos e 10 anos.



**FIGURA 55. ATRIBUIÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO METEOROLÓGICO ÀS SECÇÕES TRANSVERSAIS**

Nesta etapa foram ainda definidas as condições de fronteira. Estas são necessárias para estabelecer o comportamento das águas superficiais nas extremidades dos sistemas fluviais e trata-se de informação necessária para que o programa efetue os cálculos. Para o caso de sistemas com um fluxo de regime misto, as condições devem ser definidas para todas as extremidades abertas do sistema fluvial. As junções entre as várias linhas de água são consideradas limites internos e são determinadas automaticamente pelo programa. A metodologia utilizada para a análise deste regime de fluxo é denominada por *Local Partial Inertia* (LPI) [adaptado de *Fread*, 1996]. Os limites foram então definidos, considerando declives de profundidade normais (*Normal Depth Slope*). Este parâmetro é aplicável em rios, no entanto o programa exige que lhe sejam atribuídos valores para poder prosseguir com a metodologia. Neste caso, o utilizador tem de introduzir um valor do declive que será utilizado no cálculo da profundidade normal (equação de *Manning*) no local. A profundidade normal vai assim ser calculada para cada perfil com base no declive introduzido pelo utilizador. O valor geral de declive atribuído a todos os limites foi de 0.001. Optou-se por este valor tendo em conta o exemplo de aplicação disponibilizado no manual de utilizador do programa, no entanto pode ser um valor aperfeiçoado em trabalhos futuros.

Após ter preenchido toda a informação necessária, efetuou-se o processamento do modelo de fluxo, e os erros encontrados durante o processo foram resolvidos até se conseguir obter os perfis de inundação. Assim, para cada secção transversal obteve-se uma determinada quantidade de inundação (Figura – 56).

Depois de verificar os resultados, exportaram-se os perfis de inundação para formato SIG para posteriormente os mapear.

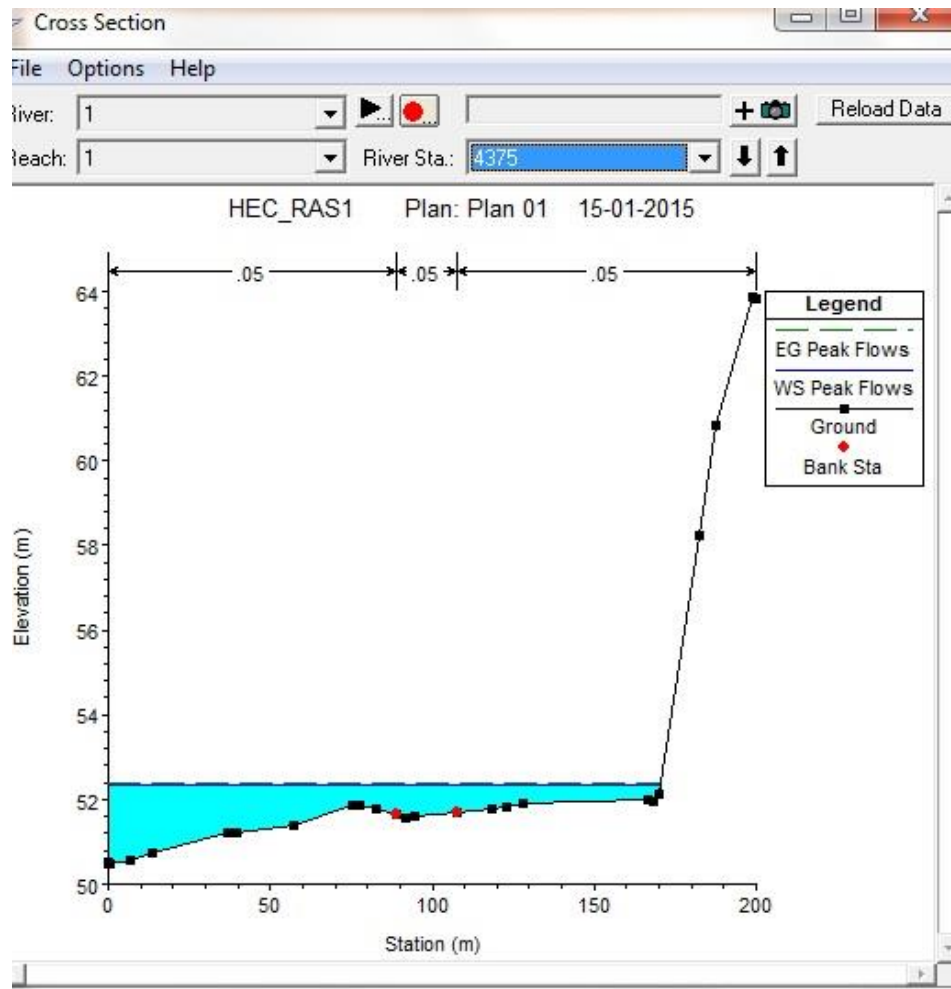


FIGURA 56. MODELAÇÃO DA INUNDAÇÃO NAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

#### 4.6.5 Mapeamento das inundações

O mapeamento dos resultados feitos na etapa anterior foi realizado através do *software* ArcGIS. O mapeamento da inundação é realizado em dois passos essenciais: primeiro, é construída a superfície de inundação TIN através das secções transversais e da elevação da água superficial; no passo seguinte, essa superfície é comparada com o MDS. A superfície TIN vai conter áreas para além da área de interesse que vão ser removidas durante o processo de delimitação, através de polígonos delimitadores importados da etapa anterior, correspondentes a cada perfil de inundação. A superfície TIN é depois convertida num *raster* que é depois comparado com o MDS para calcular a diferença de elevação com os polígonos delimitadores.

Foram mapeados os resultados obtidos para os acontecimentos de precipitação relativos ao período de retorno de 2 anos (Figura – 57) e de 10 anos (Figura – 58).



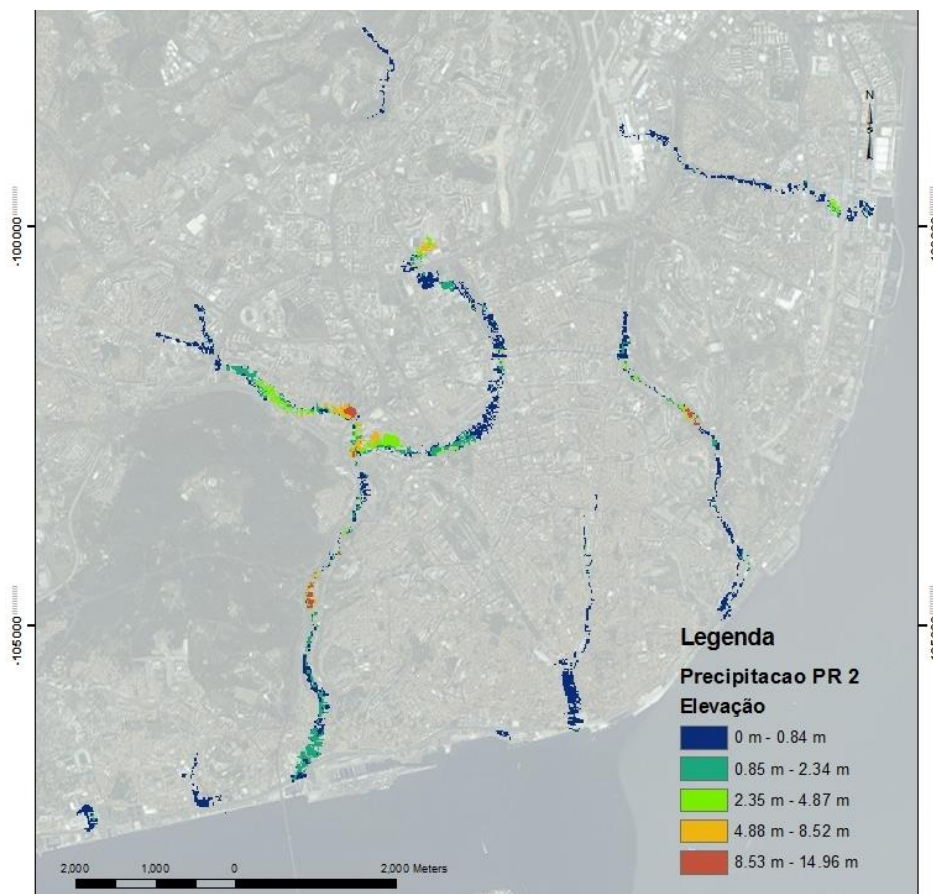


FIGURA 57. INUNDAÇÃO PARA O PERÍODO DE RETORNO DE 2 ANOS

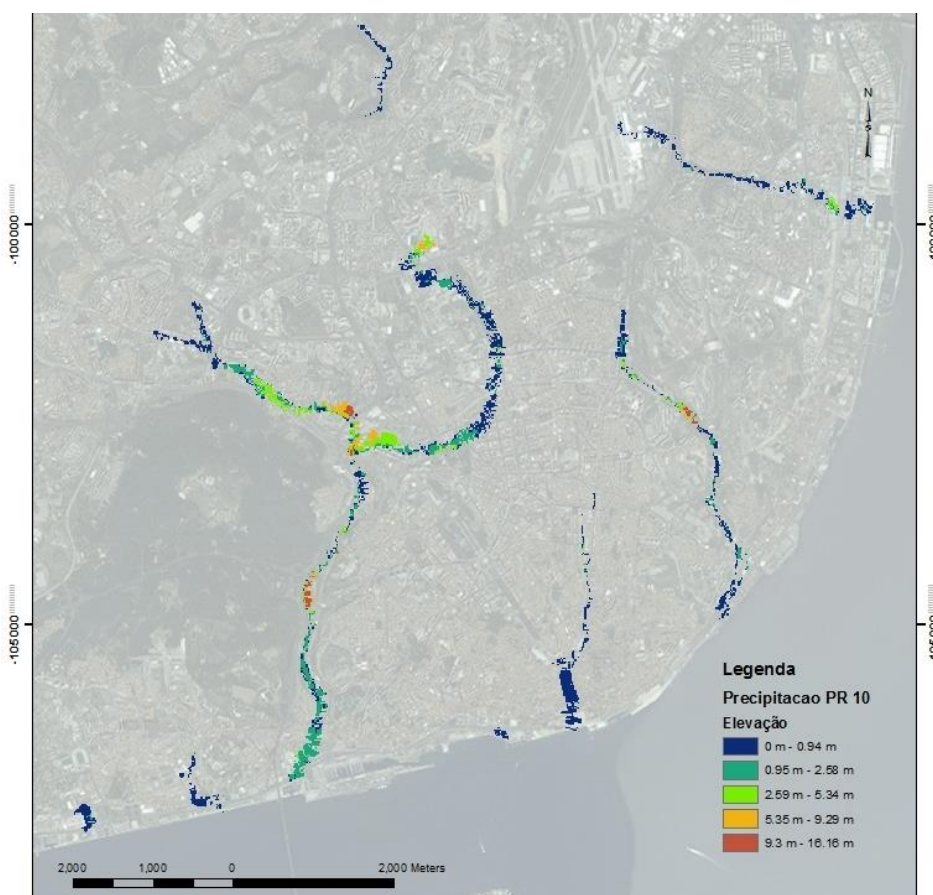
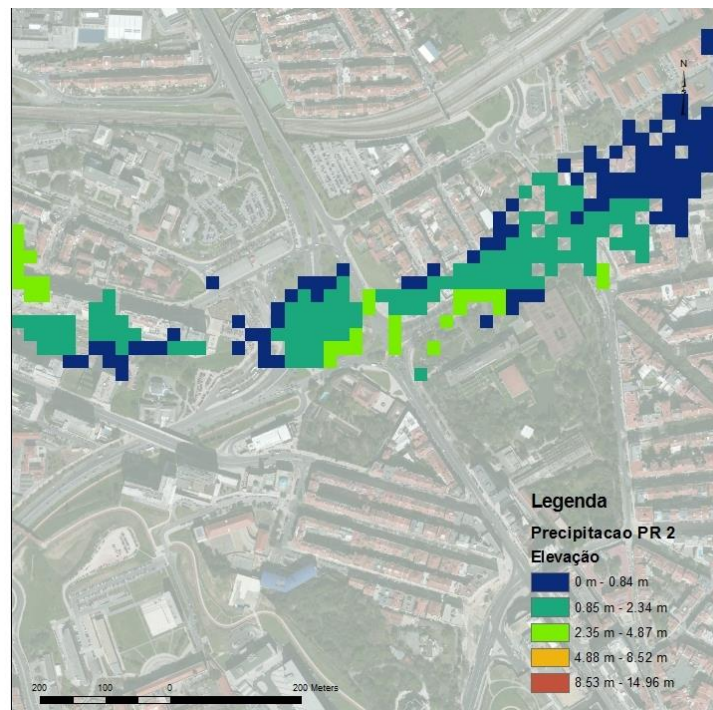


FIGURA 58. INUNDAÇÃO PARA O PERÍODO DE RETORNO DE 10 ANOS

Para o período de retorno de 2 anos obtiveram-se valores entre os 0 m e os 14.96 m, um valor médio de 1.55 m e um desvio padrão de 2.34 m. Para o período de retorno de 10 anos os resultados obtidos foram entre os 0 m e os 16.16 m, um valor médio de 1.63 m e um desvio padrão de 2.38 m. Tais valores não correspondem ao que acontece na realidade mas esse facto é em parte justificável com o caso de esta simulação não ter incluído a rede de saneamento da cidade, o que acaba por deixar à superfície, uma parte que seria desviada para a rede subterrânea. No entanto, as zonas que estão representadas com espaço inundado são maioritariamente as que costumam inundar quando existe precipitação anómala na cidade, tal como se verá mais à frente. Um outro facto verificado é que tanto num cenário como no outro, os valores muito elevados de acumulação ocorrem em zonas de vales, como se pode verificar no vale de Alcântara e no vale de Chelas. A definição dos parâmetros hidrológicos e dos parâmetros hidráulicos podem também ter influenciado este facto, no entanto é uma questão que pode vir a ser aperfeiçoada em trabalhos futuros.

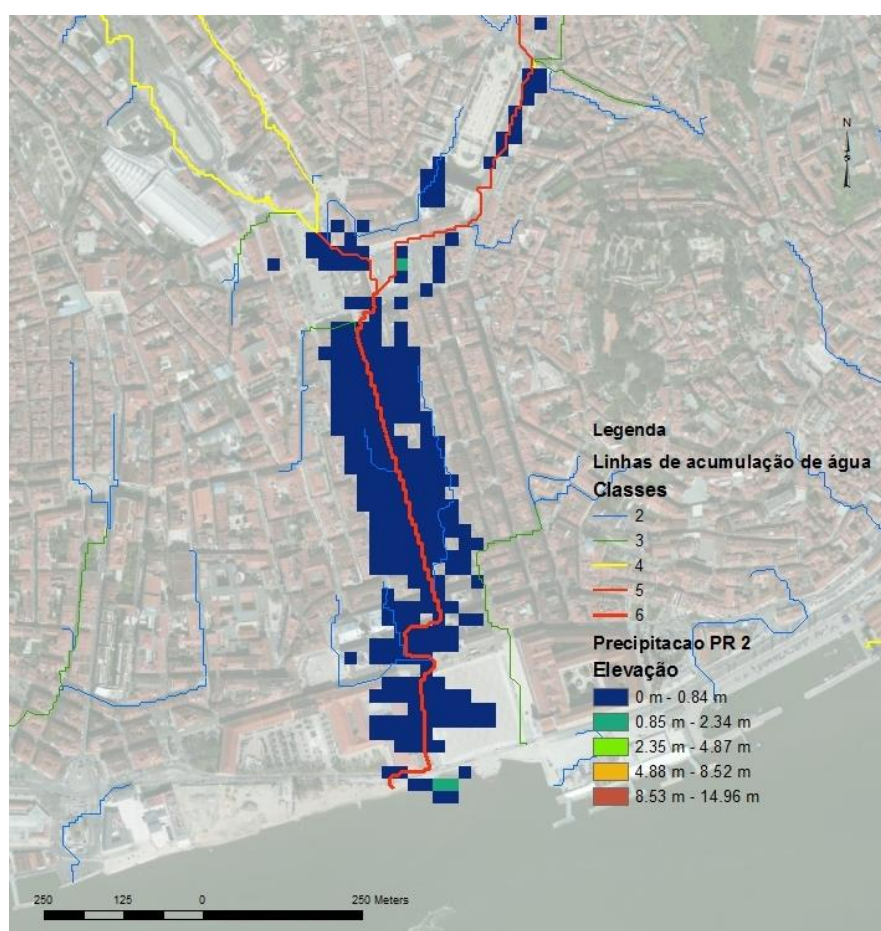
Analisando com mais detalhe algumas zonas onde ocorrem inundações frequentemente, nomeadamente a zona da Praça de Espanha (Figura – 59) e a zona do Rossio (Figura – 60), verifica-se que na zona correspondente à Praça de Espanha, o mapeamento da inundação foi bem sucedido, sendo representado por valores na ordem de 1 m para o período de retorno de 2 anos e 1.5 m para o período de retorno de 10 anos.



**FIGURA 59. INUNDAÇÃO NA PRAÇA DE ESPANHA**



A zona correspondente ao Rossio acaba por não apresentar uma representação tão próxima da realidade, existindo inundação na zona correspondente às ruas da Baixa Pombalina, mas a Praça do Rossio deveria apresentar maiores níveis de inundação. Isto acontece porque na digitalização das linhas de inundação de água, apenas se consideraram as linhas classificadas com os níveis de maior importância, ou seja, as classes 5 e 6. E as linhas de água que descem da Avenida da Liberdade e da Rua das Portas de Santo Antão são ambas de classe 4 e não foram representadas. Mas por serem tão próximas e irem as duas terminar na Praça do Rossio fazem com que esta zona seja bastante vulnerável à ocorrência de inundações.



**FIGURA 60. INUNDAÇÃO NO ROSSIO**

Analisaram-se ainda as diferenças de inundação existentes entre os dois cenários. As diferenças encontram-se entre os valores de -0.21 m e 1.22 m, com um valor médio de 0.22 m e um desvio padrão de 0.19 m (Figura – 61). Apesar dos valores muito altos registados nas inundações mapeadas para os dois cenários, as diferenças entre os dois não é muito discrepante, é aceitável. Considera-se assim que os valores muito altos acontecem realmente devido à falta de escoamento subterrâneo e à definição incorreta de determinados parâmetros e

não propriamente ao mau funcionamento do modelo, apesar de este ser direcionado para atuar sobre rios e não sobre linhas de acumulação de água.

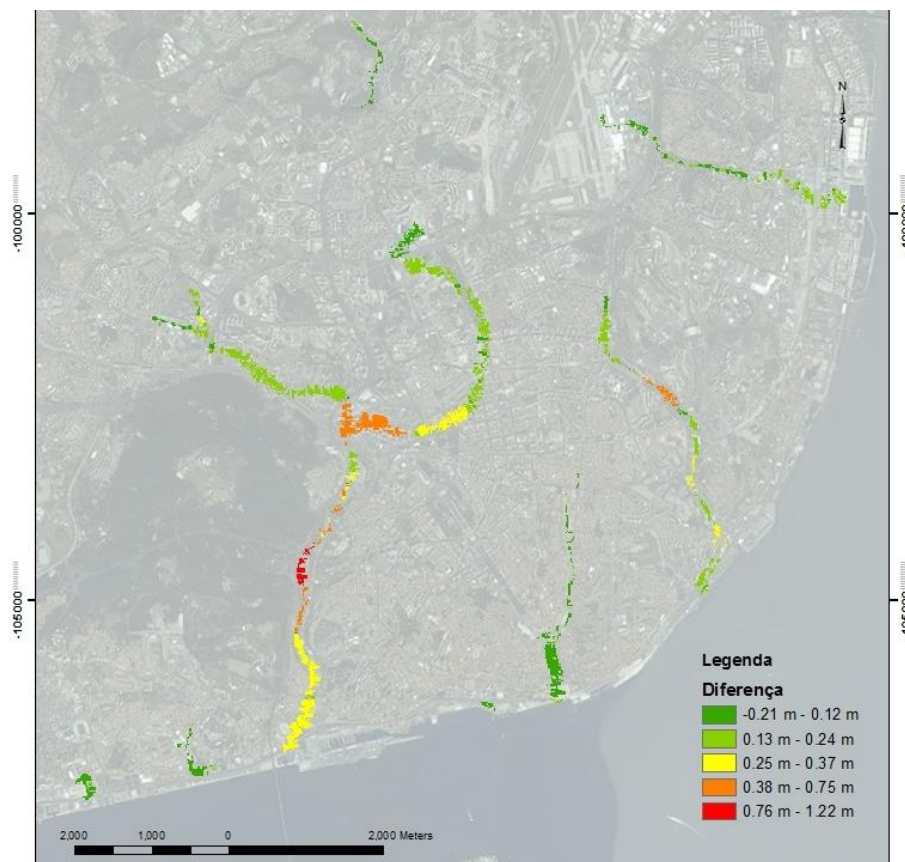


FIGURA 61. DIFERENÇAS ENTRE OS DOIS CENÁRIOS

#### 4.7 Validação dos resultados com as ocorrências do RSB

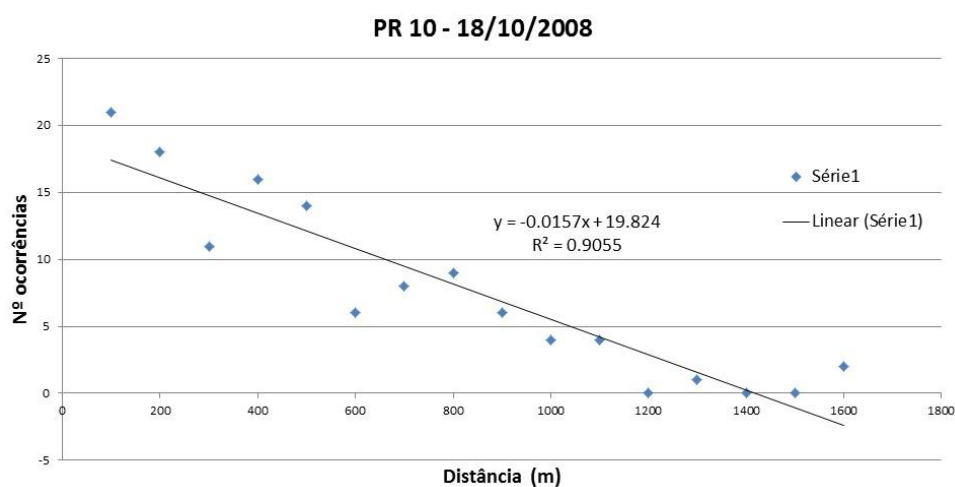
A validação dos resultados obtidos ao longo do trabalho foi feita recorrendo à utilização das ocorrências registadas pelo RSB, para deste modo entender se a distribuição das ocorrências mostra algum tipo de correlação espacial relativamente à distância a que as ocorrências se encontram das linhas de acumulação de água de maior importância estimadas neste estudo.

Das 13909 ocorrências registadas (desde 1975 até 2013, acrescidas do ano de 1967) correspondentes a dias em que ocorreu precipitação anómala, selecionaram-se apenas as ocorrências posteriores ao ano de 2000 por se considerar que a nível de edificado existe uma diferença significativa entre a realidade atual e as décadas anteriores. As ocorrências relativas ao período de 13 anos considerado foi ainda sujeito a uma filtragem, onde foram excluídas todas as ocorrências que não se encontravam diretamente relacionadas com a precipitação mas sim

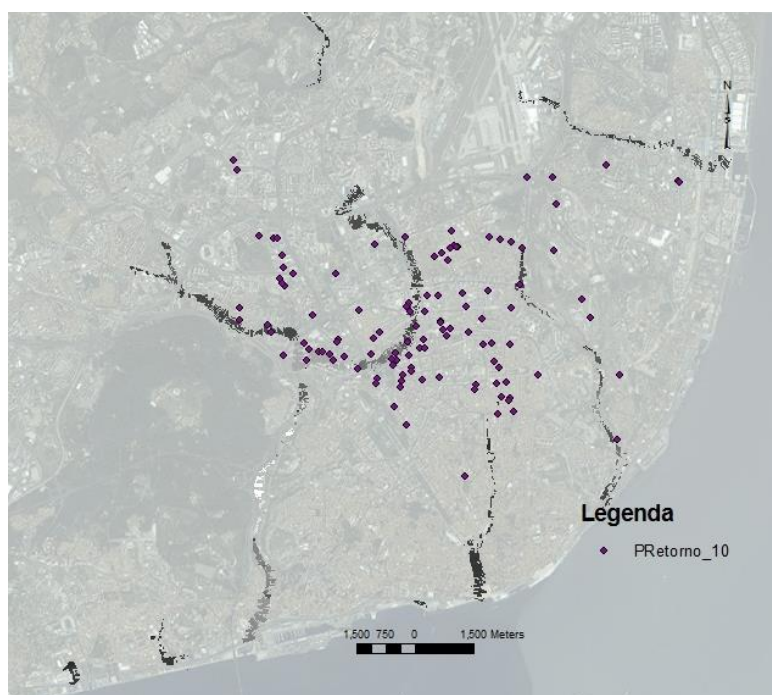
com outras manifestações de mau tempo, nomeadamente, o vento. Obteve-se assim um total de 7726 ocorrências.

Deste conjunto de dados, foram selecionadas as ocorrências relativas a dias em que se verificou precipitação com um período de retorno associado de 10 anos ou de 2 anos, para estudar a correlação espacial entre a distância às linhas de acumulação de água de maior importância e o número de ocorrências registadas.

Para tal consideraram-se as ocorrências do dia 18/10/2008 por ser a única data correspondente para o período de retorno de 10 anos e os dias 21/03/2013 e 23/09/2012 por serem as datas correspondentes ao período de retorno de 2 anos mais atuais.

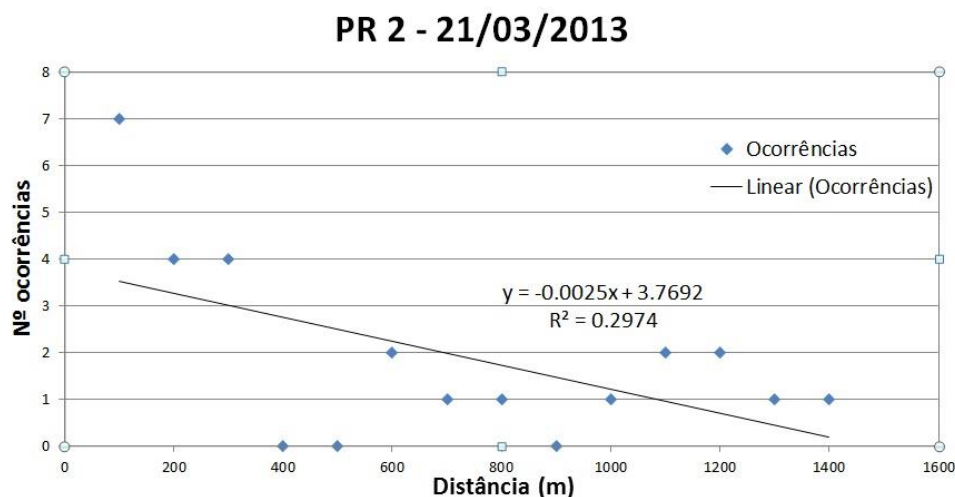


**GRÁFICO 1. CORRELAÇÃO ESPACIAL DAS OCORRÊNCIAS DO DIA 18/10/2008**

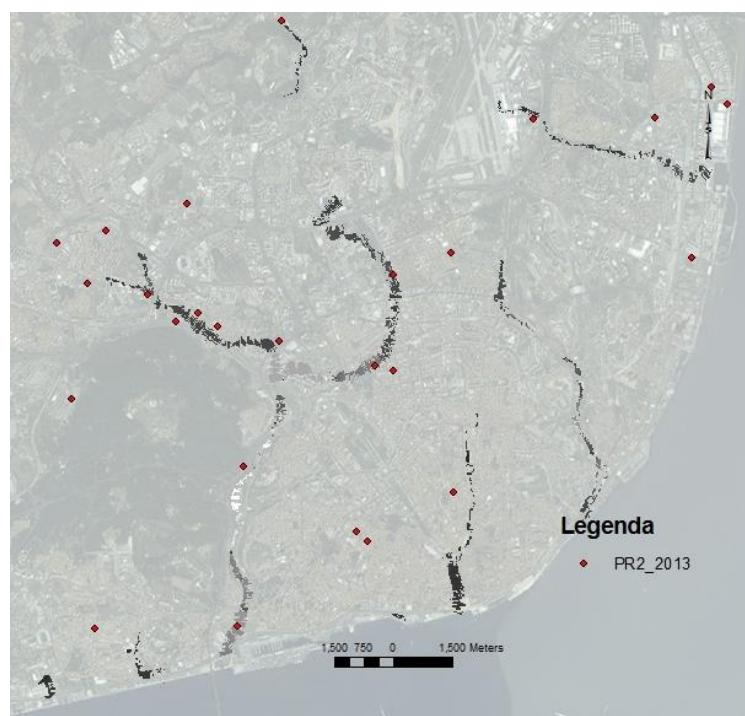


**FIGURA 62. OCORRÊNCIAS DO DIA 18/10/2008**

As ocorrências relativas ao dia 18 de Outubro de 2008 (Gráfico – 1), associadas ao período de retorno de 10 anos, consistem num total de 120 ocorrências (Figura – 62) registadas entre distâncias de 0.5 m a 1551.0 m à zona mais próxima de inundação.



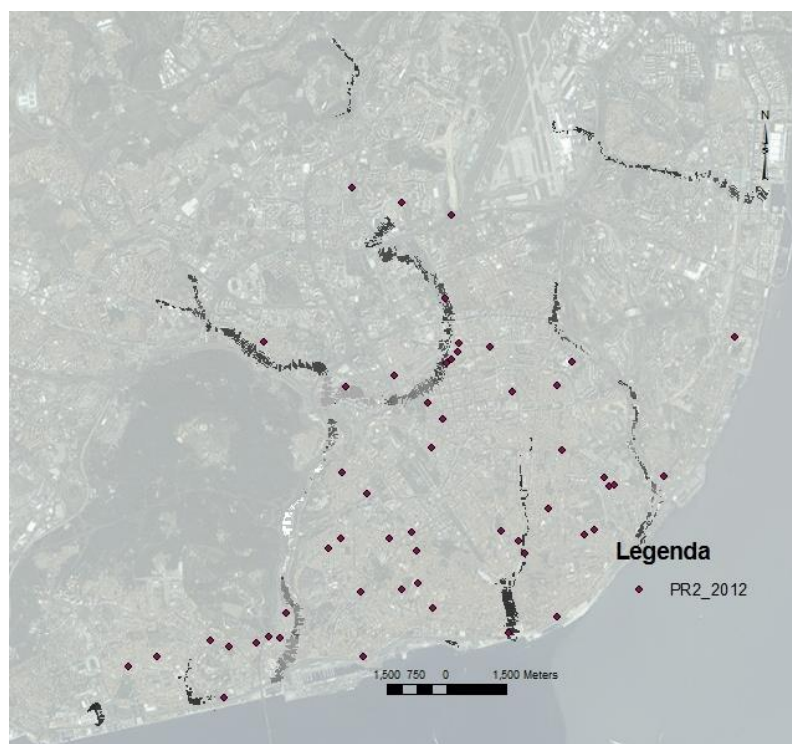
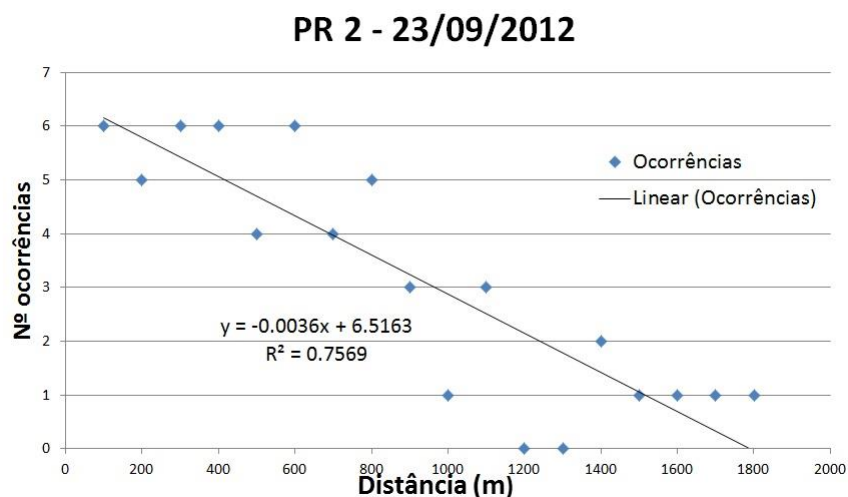
**GRÁFICO 2. CORRELAÇÃO ESPACIAL DAS OCORRÊNCIAS DO DIA 21/03/2013**



**FIGURA 63. OCORRÊNCIAS DO DIA 21/03/2013**

As ocorrências relativas ao dia 21 de Março de 2013 (Gráfico – 2), associadas ao período de retorno de 2 anos, consistem num total de 26 ocorrências (Figura – 63) registadas entre distâncias de 3.9 m a 1374.4 m à zona mais próxima de inundação.





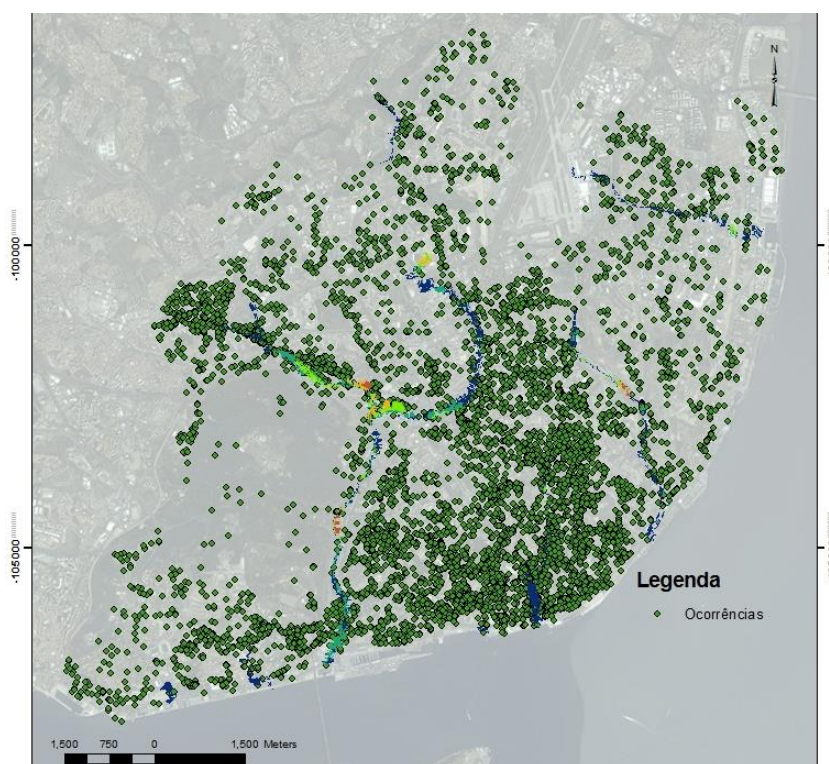
**FIGURA 64. OCORRÊNCIAS DO DIA 23/09/2012**

As ocorrências relativas ao dia 23 de Setembro de 2012 (Gráfico – 3), associadas ao período de retorno de 2 anos, consistem num total de 53 ocorrências (Figura – 64) registadas entre distâncias de 1.9 m a 1715.2 m à zona mais próxima de inundação.

Para o evento de 18/10/2008 correspondente ao período de retorno de 10 anos constata-se que existe correlação espacial entre o número de ocorrências e a distância às linhas de acumulação de água. Tal tendência já não é tão nítida para os eventos referentes ao período

de retorno de 2 anos (21/03/2013 e 23/09/2012) sendo o comportamento da amostra referente ao evento de 21/03/2013 inconclusivo.

Para além do fator distância às linhas de acumulação de água, as ocorrências registadas dependem também da localização do edificado e do estado em que este se encontra. Se se representarem todas as 7726 ocorrências (Figura – 65) é possível verificar que as zonas livres de ocorrências correspondem às zonas onde não existe edificado, como a serra de Monsanto e a zona envolvente ao aeroporto de Lisboa. Nota-se ainda uma maior concentração de ocorrências na zona correspondente à Baixa de Lisboa, podendo este facto ser associado ao facto de ser nesta zona que existe também uma maior concentração de edifícios antigos e muito deles em mau estado, o que torna estes edifícios mais vulneráveis à ação de precipitações anómalas.



**FIGURA 65. TOTAL DE OCORRÊNCIAS DE INUNDAÇÃO ENTRE 2000 E 2013**

## 5. Conclusões

Conseguiu-se com a realização deste projeto determinar um modelo hidrológico que permite identificar as zonas mais suscetíveis a inundações urbanas para a cidade de Lisboa.

Mostrou-se que um MDS LiDAR pode ser utilizado para determinar as linhas de acumulação de água causadas pelo escoamento de águas pluviais em espaço urbano porque contém objetos desviantes do curso das águas superficiais em situações de pluviosidade extrema, sendo a utilização deste mais viável que a utilização de um MDT uma vez que este contém, com uma resolução bastante detalhada, todos os elementos existentes na superfície que interferem com a direção do escoamento.

Na falta da existência de um MDS LiDAR, pode utilizar-se uma outra superfície equivalente a um MDT mas acrescida da elevação do edificado existente, denominada aqui por modelo de superfície, no entanto esta superfície não conduz a uma determinação das linhas de acumulação tão correta uma vez que carece de elementos como muros, tuneis, árvores e outros elementos, que condicionam e alteram a direção de escoamento das águas pluviais.

No seguimento da construção do modelo hidrológico foi ainda criada uma carta de impermeabilidade dos solos, com bastante detalhe, criada a partir de informação referente às redes viária e ferroviária, edificado, parques de estacionamento, cemitérios e espaços verdes, utilizando ainda as divisões BGRI para completar a informação em falta, garantindo assim uma classificação de todo o espaço incluído no concelho de Lisboa quanto à impermeabilização.

Foi realizada uma comparação entre o modelo de superfície criado e o MDS LiDAR para perceber as limitações do modelo de superfície relativamente a este último, de onde se concluiu que as maiores diferenças se encontram ao nível dos túneis, árvores, muros e outros objetos do género existentes no MDS LiDAR e não no modelo de superfície. Os valores mais discrepantes assinalados devem-se ao facto de os limites do edificado não serem exatamente os mesmos nas duas superfícies, levando assim ao aparecimento de diferenças correspondentes à altura dos edifícios.

Relativamente às diferenças entre as ferramentas hidrológicas aplicadas, disponibilizadas pela ESRI no *software* ArcGIS e as ferramentas do HEC usadas para construir o modelo hidrológico, o processo realizado pelo ArcGIS é muito mais limitativo uma vez que só permite realizar o processo até à determinação das linhas de água, considerando apenas o declive da cidade. Por outro lado, as ferramentas HEC permitem realizar a combinação do modelo de superfície, que fornece informação acerca do declive e dos objetos existentes na superfície terrestre, que alteram o curso do escoamento das águas pluviais, com a informação

referente à impermeabilidade do solo e a informação pluvial, assim como com outros parâmetros hidrológicos e hidráulicos necessários ao funcionamento do modelo hidrológico, permitindo determinar as zonas inundadas na cidade quando ocorrem determinados cenários de precipitação. Contudo, para obter resultados mais realistas, o modelo necessita de ser aperfeiçoado, principalmente com informação relativa ao escoamento subterrâneo, nomeadamente, a rede de saneamento da cidade.

Os resultados obtidos foram ainda validados através da análise da correlação espacial da distância, utilizando, para datas específicas, dados de ocorrências registadas pelos RSB, relacionadas com inundações, em dias de precipitação anómala, de onde se pôde concluir que para a amostra referente ao período de retorno de 10 anos se verifica a existência de correlação espacial. No caso das amostras referentes ao período de retorno de 2 anos, não se obteve uma correlação tão nítida, sendo a amostra do ano de 2013 inconclusiva. Tal resultado é justificável com o facto de existir má classificação de algumas ocorrências, que acabam por ser classificadas como se fossem eventos relacionados com precipitação e na realidade não o são.

## 5.1 Limitações

A principal limitação encontrada ao longo deste trabalho foi o facto de não existir uma superfície LiDAR representativa de todo o espaço da cidade de Lisboa. No entanto, a criação de um modelo de superfície, ainda que escasso de alguma informação e não tão realístico como um MDS LiDAR, atenuou essa limitação, sendo utilizado em substituição do MDS LiDAR para criar o modelo hidrológico.

O facto do *software* utilizado para estimar a área de inundação ser direccionado para determinar cheias em rios e não propriamente para determinar linhas de acumulação de água em ambiente urbano foi também um fator limitativo para o projeto, exigindo a introdução de valores para variáveis que não se adequam a ambiente urbano. Contudo, a estratégia adotada para contornar este problema teve sucesso.

Uma outra limitação consistiu na incapacidade de no modelo hidrológico, atribuir os valores de impermeabilidade ao solo, tal como ele se encontra classificado, ao invés da utilização de valores médios para cada uma das sub-bacias. Esta limitação acaba por estar relacionada com a anterior, pois nas zonas envolventes aos rios, em espaços mais rurais, a impermeabilidade não varia tanto como num ambiente urbano.

O facto de não se integrar a rede de saneamento da cidade no modelo hidrológico é provavelmente o fator mais delimitador neste projeto, uma vez que se pressupõe que a sua



integração melhoraria bastante os resultados finais. A sua integração seria possível se se estudassem zonas detalhadas da cidade, no entanto, estudando a cidade no geral tal não foi possível porque a informação existente é escassa, muito incompleta e com falhas nas ligações entre os coletores, não existe informação geográfica sobre a localização das sarjetas, a percentagem de água absorvida em cada coletor e o tipo de material pelo qual cada coletor é constituído são informações desconhecidas na maioria dos casos, e todos estes fatores não iriam permitir simular um correto escoamento subterrâneo das águas. Por estas razões, optou-se por não integrar essa informação no estudo.

## **5.2 Perspetivas Futuras**

A rede de saneamento, e a localização das sarjetas em toda a cidade seriam dados importantes a integrar no modelo, para permitir atingir resultados mais verídicos. Apesar da escassa informação existente para utilizar neste caso, reconhece-se que a sua integração seria uma mais-valia muito grande para este trabalho, e sugere-se que a criação de uma rede de saneamento simulada, construída de forma a ser o mais realista possível, contribuiria para melhorar os resultados obtidos.

A utilização de valores de precipitação mais detalhados para a cidade constituirá também um melhoramento ao trabalho, uma vez que neste projeto apenas foi utilizado para cada cenário um valor de precipitação para toda a cidade. Na realidade, o que acontece é que em diferentes locais da cidade podem chover diferentes valores de precipitação, o que poderá alterar o volume de acumulação de água em cada uma dessas zonas.

Testar outros modelos de fluxo e aprofundar mais o estudo dos parâmetros hidrológicos e hidráulicos a introduzir no modelo hidrológico são também experiências que podem ser feitas no sentido de aperfeiçoar este modelo hidrológico da cidade, com o intuito de se obterem resultados cada vez mais realistas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Aktaruzzaman, T., (2011) *“Detailed digital surface model (DSM) generation and automatic object detection to facilitate modelling of urban flooding”*, Dissertation, Institute of Urban Water Management, University of Kaiserslautern, Germany.
- Al-Sabhan, W., Mulligan, M., Blackburn, G.A., (2013) *“A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW”*, Computer, Environment and Urban Systems, Vol.27, pp.9 – 32.
- Arthur S., Dell, V., Pender, G., (2008) *“The use of a LiDAR DEM in modelling sewerage derived urban flood wave routing”*, 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburg, Scotland, UK.
- Associação Portuguesa de Trabalhadores (2014), *“CIRAC – Cartas de Inundação e Risco em Cenários de Alterações Climáticas”*, Disponível: <https://www.apseguradores.pt/site/cirac.aspx>, [Acedido em 24 de abril de 2015].
- Birth, N., Braswell, G., (2011) *“The urban drainage model: SF DPW uses LiDAR DEM and a custom algorithm for delineating drainage catchments and hydrologic modelling”*, The BAAMA Journal, Volume 5, pp. 5 - 6.
- Brandão, C., Pinto da Costa, J. e Rodrigues, R. (2001) *“Análise de fenómenos extremos precipitações intensas em Portugal Continental”*, INAG, Lisboa.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988) *“Applied Hydrology”*, Tata McGraw-Hill Education (reprint edition).
- Chow, V.T. (1959) *“Open-channel hydraulics”* New York, McGraw-Hill.
- COMET Program (2010) *“Streamflow Routing International Edition”*, University Corporation for Atmospheric Research. Disponível em: [http://stream2.cma.gov.cn/pub/comet/HydrologyFlooding/StreamflowRoutingInternationalEdition/comet/hydro/basic\\_int/routing/index.htm](http://stream2.cma.gov.cn/pub/comet/HydrologyFlooding/StreamflowRoutingInternationalEdition/comet/hydro/basic_int/routing/index.htm) [Acedido em 15 de janeiro de 2015].
- Correia, F., Saraiva, M.G.; Rocha, J.; Fordham, M.; Bernardo, F.; Ramos, I.; Marques, Z.; Soczka, L. (1994) – *“The planning of flood alleviation measures: interface with the public”*, in Penning-Rowell, E. & Fordham, M. (edits.), *Floods Across Europe – hazard assessment, modelling and management*, Middlesex University Press, London.

DECRETO- LEI nº27/2006. D.R. I Série. 126 (03-06-2007) 4696.

Dias, P. (2013) “Elaboração de uma carta de aterros da cidade de Lisboa por LiDAR e fotogrametria aérea”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Elberink, S., Gorte, B., Karimlou, G., Verbree, E., Vries, M., (2013) “*Semantic 3D city model to raster generalisation for water run-off modelling*”, *3D GeoInfo 2013 – 8<sup>th</sup> 3D GeoInfo Conference*, Netherlands.

ESRI, (2009) “ArcGIS Desktop 9.3 Help”, Disponível em: [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=An overview of the Hydrology tools](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=An%20overview%20of%20the%20Hydrology%20tools), [Acedido em maio de 2014].

Falcão, I. (2012), “Extração semi-automática tridimensional dos principais elementos de um perfil rodoviário a partir de dados LiDAR”, Tese de Mestrado. Universidade de Lisboa.

Faria, R., Pedrosa, A., (2005). “Impactos da urbanização na degradação do solo urbano e sua relação com o incremento de inundações urbanas em Santa Maria da Feira”, *International Symposium in Land Degradation and Desertification*, Faculdade de Letras da Universidade do Porto.

Fread, D.L., Jin, M. and Lewis, M. (1996) “*Na LPI Numerical Solution for Unsteady Mixed Flow Simulation*”, *North American Water Congress*, Anaheim, CA June 22-28, American Society of Civil Engineers.

Hawkins, H., Hjermfelt, T., Quan, D., Van Mullem, A. and Woodward, E., (2002). “*Curve Number Method: Origins, Applications and Limitations*”, *Proceedings of Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, Nevada.

HydroCAD (2015) “*HydroCAD Stormwater Modelling*”, HydroCAD Software Solutions LCC, Disponível em: <http://www.hydrocad.net/curvenumber.htm>. [Acedido em janeiro de 2015].

Korzeniowska, K. (2012) “*Modelling of water surface topography on the Digital Elevation Models using LiDAR data*”, Jagiellonian University, Institute of Geography and Spatial Management, Cracow, Poland.

Lencastre, A., Franco, F. M. (1984) “*Lições de Hidrologia*”, texto não publicado, Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa.

Maidment, D. R. (1993) “*GIS and hydrological modelling*” In M. F. Goodchild, B. Parks, & L. Steyaert, *Environmental modelling with GIS*, pp. 147–167. New York, USA: Oxford University Press.

- Matos, J. (2008) "Fundamentos de Informação Geográfica". Ed. LIDEL – Edições técnicas, 5ª edição, Lisboa.
- Morin, K. (2002) "Calibration of Airborne Laser Scanner", *Dissertation, University of Calgary, Canada*.
- Mosuro, S. (2012) "CityFIT Urban Guide: Modelling and Deploying indicators of Property Exposure to Flooding in Lagos using LIDAR DEM and DSM data", *Dissertation in GIS, University of Edinburgh*.
- Newson, M. (1992) "Land, water and development: river basin systems and their sustainable management", p.71, London: Routledge.
- Oliveira, G. (2014) "Prevenir Socorrer Comunicar – Riscos Naturais e Proteção Civil", Manual para instituições, empresas e jornalistas, Câmara Municipal de Abrantes e Associação Humanitária de Bombeiros Voluntários de Abrantes.
- Oliveira, P., Pereira, B., Ramos, C., Santos, C., Soares, A., Vaz, T. (2005) – "Inundações urbanas: o caso das ruas de Stª Marta, S. José e Portas de Stº Antão", Departamento de Geografia e Centro de Estudos Geográficos, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.
- Pais, F., Moreira, M., (2005). "Avaliação da Incidência ao Risco de Inundação - Aplicação a um Caso Particular no Concelho de Lisboa". 7.º Simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua oficial portuguesa, Évora, maio.
- Peixoto, J.P. (1987) "As variações do clima e do ambiente", Secretaria de Estado do Ambiente e dos Recursos Naturais, Lisboa.
- QGIS Project (2014) "QGIS User Guide, Release 2.2", December 04.
- Redweik, P. (2012) "Produção Cartográfica", apontamentos das aulas de Produção Cartográfica, texto não publicado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Redweik, P., Catita, C., Brito, M.C. (2011) "3D Local Scale Solar Radiation Model Based on Urban LiDAR Data", Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Ribeiro, A., Cardoso, A., (2014) "Integração de modelos de simulação em SIG: aplicação ao caso da drenagem das águas pluviais urbanas", I Jornadas Lusófonas de Ciência e Tecnologias de Informação Geográfica, Coimbra.

- Sanhueza, J. (2007) “Extração semi-automática de feições planas e cálculo de entidades pontuais a partir dos dados LiDAR para o apoio fotogramétrico”, Tese de Mestrado, Curitiba, Brasil.
- Serviço Municipal de Proteção Civil (2001) “Proteção Civil e Socorro”, Câmara Municipal de Lisboa, Disponível: <http://www.cm-lisboa.pt/viver/seguranca/protecaao-civil-e-socorro>, [Acedido em 10 de agosto de 2014].
- Serviço Municipal de Proteção Civil (2009) “Risco de inundação no município de Lisboa”, texto não publicado, Gabinete de Análise de Riscos, Departamento de Proteção Civil, Lisboa.
- Serviço Municipal de Proteção Civil (2012) “Plano Municipal de Emergência”, Departamento de Proteção Civil, Câmara Municipal de Lisboa.
- Silva, A. (2002) – “Avaliação das paisagens da bacia hidrográfica da ribeira de Colares: estudo geográfico e de perceção ambiental”. Dissertação de mestrado, Departamento de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- USACE, Hydrologic Engineering Centre, Hydrologic Modelling System HEC- GeoHMS, Technical Reference Manual, October 2010. URL: [www.usace.army.mil](http://www.usace.army.mil), [Acedido em setembro de 2014].
- USACE, Hydrologic Engineering Centre, Hydrologic Modelling System HEC- GeoRAS, Technical Reference Manual, February 2011. URL: [www.usace.army.mil](http://www.usace.army.mil), [Acedido em 9 de novembro de 2014].
- USACE, Hydrologic Engineering Centre, Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, January 2010. URL: [www.usace.army.mil](http://www.usace.army.mil), [Acedido em 10 de setembro de 2014].
- USACE, Hydrologic Engineering Centre, Hydrologic Modelling System HEC- RAS, Technical Reference Manual, January 2010. URL: [www.usace.army.mil](http://www.usace.army.mil), [Acedido em 15 de outubro de 2014].
- Yunjae Choung, B. E. (2009) “Extraction of blufflines from 2.5 dimensional Delaunay triangle mesh using LiDAR data”, Dissertation, The Ohio State University, United States of America.
- Vaz D., (2010) “Alterações climáticas, riscos ambientais e problemas de saúde: breves considerações”, II Seminário Ibero Americano de Geografia Física, Universidade de Coimbra.

## ANEXO A – PRECIPITAÇÕES ASSOCIADAS A DIVERSAS DURAÇÕES E DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO (MM)

Fonte: Brandão C.; Rodrigues R., Pinto da Costa J., 2001. Análise de fenómenos extremos precipitações intensas em Portugal Continental, INAG, Lisboa

Período Retorno (anos)	Posto Udográfico	Duração									
		5min	10min	15min	30min	1h	2h	3h	6h	12h	24h
2	Lx IGIDL	6.3	8.7	10.5	14.6	19.2	24.9	29.0	37.5	44.2	54.4
	Lx Portela	6.8	9.5	11.6	16.2	19.5	23.9	26.8	32.8	39.3	46.5
5	Lx IGIDL	8.0	11.3	13.9	19.6	25.8	33.2	38.5	49.6	57.0	69.2
	Lx Portela	10.0	13.7	16.4	22.3	27.4	34.6	39.6	49.9	60.0	70.8
10	Lx IGIDL	9.1	13.0	16.1	22.9	30.0	38.6	44.7	57.4	65.4	78.8
	Lx Portela	12.2	16.4	19.5	26.2	32.7	41.7	48.2	61.5	73.7	86.7
20	Lx IGIDL	10.2	14.7	18.1	26.1	34.1	43.8	50.7	65.2	73.6	88.2
	Lx Portela	14.2	19.0	22.5	30.1	37.8	48.7	56.4	72.7	86.8	101.9
50	Lx IGIDL	11.6	16.8	20.9	30.2	39.4	50.5	58.4	74.9	84.0	100.2
	Lx Portela	16.8	22.4	26.4	35.0	44.2	57.4	66.9	86.8	103.9	121.8
100	Lx IGIDL	12.7	18.4	22.9	33.3	43.4	55.6	64.2	82.3	91.9	109.1
	Lx Portela	18.8	24.9	29.3	38.7	49.0	64.0	74.8	97.5	116.7	136.7
500	Lx IGIDL	15.1	22.1	27.7	40.5	52.7	67.4	77.9	99.7	109.7	129.6
	Lx Portela	23.4	30.7	36.0	47.2	60.3	79.3	93.0	122.3	146.3	171.2
1000	Lx IGIDL	16.2	23.7	29.7	43.6	56.5	72.3	83.5	106.8	117.8	138.9
	Lx Portela	25.4	33.3	38.9	51.0	65.1	85.7	100.8	132.8	158.8	185.8